





رحلة الماء من المالح إلى العذب

د. هشام الزيات & د. شريف قنديل
معهد الدراسات العليا والبحوث،
جامعة الاسكندرية



عالم البيئة
سلسلة بيئية تصدرها مؤسسة زايد الدولية للبيئة









رحلة المـاء
من المالـح إلى العـذب

تأليــف

د هشام الزيات & د شريف قنديل

معهد الدراسات العليا والبحوث - جامعة الإسكندرية

١٤٣٩ هـ - ٢٠١٨م



وَأَن لَّيْسَ لِلْإِنسَـٰنِ إِلَّا مَا سَعَىٰ ﴿٣٩﴾

وَأَنَّ سَعْيَهُۥ سَوْفَ يُرَىٰ ﴿٤٠﴾ ثُمَّ يُجْزَىٰهُ ٱلْجَزَآءَ ٱلْأَوْفَىٰ ﴿٤١﴾

وَأَنَّ إِلَىٰ رَبِّكَ ٱلْمُنتَهَىٰ ﴿٤٢﴾

تقديم

يقول المولى عز وجل في محكم تنزيله:

﴿وَهُوَ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيَاحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ حَتَّى إِذَا أَقَلَّتْ سَحَابًا ثِقَالًا سُقْنَاهُ لِبَلَدٍ مَّيِّتٍ فَأَنزَلْنَا بِهِ الْمَاءَ فَأَخْرَجْنَا بِهِ مِن كُلِّ الثَّمَرَاتِ كَذَلِكَ نُخْرِجُ الْمَوْتَى لَعَلَّكُمْ تَذَكَّرُونَ﴾ (الأعراف ٥٧)

﴿وَمِنْ آيَاتِهِ أَنَّكَ تَرَى الْأَرْضَ خَاشِعَةً فَإِذَا أَنزَلْنَا عَلَيْهَا الْمَاءَ اهْتَزَّتْ وَرَبَتْ إِنَّ الَّذِي أَحْيَاهَا لَمُحْيِي الْمَوْتَى إِنَّهُ عَلَى كُلِّ شَيْءٍ قَدِيرٌ﴾ (فصلت ٣٩)

﴿وَهُوَ الَّذِي خَلَقَ مِنَ الْمَاءِ بَشَرًا فَجَعَلَهُ نَسَبًا وَصِهْرًا وَكَانَ رَبُّكَ قَدِيرًا﴾ الفرقان ٥٤

إن أهمية الماء للحياة لا تخفى على أحد ولا حياة بلا ماء، فقد أشار القرآن الكريم بوضوح إلى أن إحياء الأرض مرتبط بتوفر الماء. لذلك نجده عنصراً أساسياً في توجيه التخطيط الإستراتيجي لأي دولة وعاملاً رئيساً من عوامل الصراع بين الدول، بل وبين المجتمعات في الدولة الواحدة خاصة المجتمعات الرعوية في بلادنا العربية.

وبما أن دولة الإمارات العربية المتحدة واحدةً من البلدان الأكثر جفافاً في العالم، فهي تتبوأ مكانة رائدة عالمياً في صناعة تحلية المياه ضمن التزامها المسؤول بتوفير الحلول المناسبة للتحديات المتعلقة بتوفير المياه وإدارتها المتكاملة لتحقيق الأمن المائي. إذ هي في المرتبة الثانية عالمياً بمجال تحلية المياه، وتنتج ١٤٪ من كمية الماء المحلاة في العالم، علماً بأن تحلية مياه البحر تتطلب طاقة تزيد بنحو ١٠ مرات على ما يتطلبه إنتاج المياه السطحية العذبة، ومن المتوقع أن تزيد تكاليف تحلية المياه كثيراً في المستقبل.

يتناول هذا الكتاب إحدى أهم التحديات التي تواجه المنطقة العربية ومناطق أخرى كثيرة حول العالم وهي اللجوء إلي تحلية مياه البحر كخيار إستراتيجي لسد احتياجات السكان وتعويض النقص في الموارد المائية الطبيعية المتجددة، خاصة في ظل الزيادة السكانية المستمرة التي يزداد معها الطلب على المياه للإستخدامات اليومية وللإنتاج الزراعي والحيواني اللازمين لتوفير الأمن الغذائي. وبالرغم من التكلفة الإقتصادية العالية لتحلية المياه وما يترتب عليها من آثار بيئية ضارة، الا أنها ضرورية في البلدان التي لا تملك مصادر بديلة.

وقد تعرض الكتاب للعديد من الجوانب المهمة مثل طُرق التحلية وإقتصادياتها والتقنيات الحديثة وإستخدام الطاقة المتجددة في التحلية.

نود أن نشكر الدكتور هشام الزيات والدكتور شريف قنديل اللذان تفضلا باعداد هذا الكتاب الهام ، والشكر موصول للمحكمين ولهيئة التحرير على جهودهم في مراجعة وتدقيق الكتاب،

كما نود هنا أن ندعو كل العلماء والخبراء العرب لتأليف أو ترجمة عناوين تساهم في توفير المعلومة العلمية اللازمة للتنمية المستدامة والرقي الحضاري في الوطن العربي، ومؤسسة زايد من جانبها ملتزمة بطباعة واصدار أي كتاب يحقق أهداف «سلسة كتاب عالم البيئة» ويكون اضافة حقيقية للمكتبة العربية حسب ما تجيزه هيئة التحرير والمحكمين المتخصصين.

مع تمنياتي لكم بقراءة شيقة ومفيدة.

أ. د / محمد أحمد بن فهد

رئيس تحرير السلسلة

رئيس اللجنة العليا لمؤسسة زايد الدولية للبيئة

إهداء

إلى فريق العمل الرائع في «مشروع تحلية المياه» بقسم علوم المواد، معهد الدراسات العليا والبحوث، جامعة الإسكندرية، زملائي وتلامذتي الذين عملوا بجهد وجد لجعل حياة الناس أفضل وأكرم

أ.د. شـريف قنديل

إلى كل إنسان يهتم بسعادة غيره، وخصوصاً أخي الحبيب دكتور محمد الزيات وأخي الفاضل دكتورغازي العتيبي

هشـام الزيـات

شكر وتقدير

جزء مهم من المادة العلمية لهذا الكتاب جُمع أثناء عمل الدكتور هشام الزيات بجامعة الدمام، لذا نتوجه بخالص الشكر وفائق التقدير لكامل إدارة هذه الجامعة الرائدة في الدراسات البيئية والعلوم الحديثة، وبصفة خاصة إلى معالي الأستاذ الدكتور عبدالله الروبيش، مدير الجامعة، وسعادة الدكتور باسم الشيخ، نائب المدير للشؤون الأكاديمية سابقاً، وسعادة الدكتور غازي العتيبي، نائب المدير للشؤون الأكاديمية حالياً.

ويود المؤلفان توجيه الشكر لصندوق دعم العلوم والتنمية التكنولوجية، أكاديمية البحث العلمي والتكنولوجيا (مصر)، لتمويله مشروعاً بحثياً لتحضير أغشية تحلية المياه بقسم علوم المواد، جامعة الإسكندرية، فكان هذا المشروع دافعاً لتأليف هذا الكتاب.

بكل امتنان نشكر زملاءنا وطلابنا وأصدقاءنا على ما قدموه من وقت وجهد في مراجعة المسودات، وعلى اقتراحاتهم وأفكارهم القيمة التي أضافت كثيراً إلى الكتاب، ونخص بالذكر كُلاً من الدكتور أحمد الفطاطري، الكيميائي خالد المهداوي، الدكتور أحمد كريم، المهندسة راندة فتحي، والكيميائية مروة خليل.

أخيراً وليس آخراً نعبر عن جزيل شكرنا وخالص امتناننا للأستاذ الدكتور وليد الزباري، منسق برنامج إدارة الموارد المائية بجامعة الخليج العربي (البحرين)، وقد تفضل بإمدادنا بنسخة إلكترونية من مقاله الأحدث عن حالة المياه في المنطقة العربية وبمراجعة المسودة الأخيرة من الكتاب مراجعة دقيقة من الناحيتين العلمية واللغوية.

تقديم الأستاذ الدكتور وليد الزباري

منسق برنامج إدارة الموارد المائية بجامعة الخليج العربي

«مكتوب بشكل مشوق ويقدم الحقائق والمعلومات العلمية بشكل مبسط يستطيع قراءاتها وفهمها شريحة كبيرة من المجتمع العربي»

أ. د. وليد الزباري

جامعة الخليج العربي

المحتـــوى

هذا الكتاب

﴿أَنزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَالَتْ أَوْدِيَةٌ بِقَدَرِهَا فَاحْتَمَلَ السَّيْلُ زَبَدًا رَابِيًا وَمِمَّا يُوقِدُونَ عَلَيْهِ فِي النَّارِ ابْتِغَاءَ حِلْيَةٍ أَوْ مَتَاعٍ زَبَدٌ مِثْلُهُ كَذَلِكَ يَضْرِبُ اللَّهُ الْحَقَّ وَالْبَاطِلَ **فَأَمَّا الزَّبَدُ فَيَذْهَبُ جُفَاءً وَأَمَّا مَا يَنْفَعُ النَّاسَ فَيَمْكُثُ فِي الْأَرْضِ** كَذَلِكَ يَضْرِبُ اللَّهُ الْأَمْثَالَ﴾

— الآية ١٧ من سورة الرعد

أردنا أن يكون هذا الكتاب رحلة مفيدة وممتعة في عالم المياه وتحليتها، ونأمل أن تجدوها كذلك. يتناول الكتاب موضوع تحلية المياه المالحة من زواياه المختلفة: تاريخية، إنسانية، تقنية، اقتصادية، بيئية، جغرافية، وحتى سياسية.نستطيع أن نجمل الأهداف الرئيسية لهذا الكتاب فيما يلي:

- توفير دليل "عربي" عن صناعة التحلية من أجل المهتمين بهذا المجال (أياً كانت اختصاصاتهم) يتميز بأنه شامل، عملي، وسهل الفهم؛
- تجميع ومراجعة لأهم المعلومات، المؤلفات، والمصادر المتوفرة في مجال تحلية الماء المالح ـ خاصة المهمة منها للعالم العربي؛
- والتعرف على اتجاهات البحث والتطوير في صناعة التحلية.

حاولنا أن تكون لغة الكتاب سهلة ودقيقة علمياً ليكون مفهوماً ومفيداً لأكبر عدد من القراء، ونظن أنه سيكون مناسباً للفئات التالية بشكل خاص:

- صانعي السياسات ومتخذي القرارات في المجالات المتعلقة بالمياه والكهرباء؛
- طلاب الدراسات العليا الراغبين في إجراء مشروعات أبحاثهم في مجال تحلية المياه؛
- خريجي الجامعات الراغبين في العمل بهذا المجال؛
- والمستثمرين الراغبين في المشاركة في مشروعات تحلية المياه.

لقد حرصنا ألا يتطلب استيعاب محتوى هذا الكتاب (أو معظمه) سوى الإلمام بالمبادئ العلمية الأساسية التي تدرس غالباً في التعليم المدرسي (ما قبل الجامعي)، لذا يحتوي الكتاب على الكثير من الأشكال التوضيحية (أكثر من ١٧٠ شكلاً) وملحقين لتوضيح بعض المفاهيم الصعبة أو المتخصصة.

ينقسم الكتاب إلى ثلاثة أجزاء رئيسية. يتناول الجزء الأول وضع الماء في الوجدان الإنساني، أهمية الماء للحياة، وخصائص الماء الفريدة. ويستعرض الجزء الثاني باختصار حالة المياه العربية. أما الجزء الثالث وهو الأكبر فيناقش موضوع تحلية المياه المالحة من جوانبها المختلفة:

- بدايتها وتطورها؛
- تقنيات وطرائق التحلية الرئيسية، ومزايا كل طريقة وحدودها؛
- تكاليف التحلية والعوامل المحددة لها؛
- آفاق "التحلية المتجددة"؛
- الآثار البيئية للتحلية وكيفية الحد منها؛
- وضع التحلية في العالم العربي؛
- اتجاهات البحث والتطوير في تكنولوجيا الأغشية؛
- ومستقبل التحلية في العالم والمنطقة العربية.

أضفنا إلى صلب الكتاب ملحقين اثنين: الأول عبارة عن مقدمة متعددة الزوايا لمفهوم الطاقة "الغامض" والمحوري في العلوم الطبيعية والحياة الحديثة، والثاني مقدمة قصيرة لكيمياء وتكنولوجيا الأغشية.

إضافة إلى أهداف الكتاب الخاصة بموضوع تحلية المياه، سعينا لأن يكون الكتاب مفيداً أيضا في فتح باب النقاش حول القضايا العامة التالية: تعريب العلوم والتكنولوجيا، تبسيط العلوم بالعربية، وتصميم الكتب الدراسية العربية.

تُعَد علوم التحلية من العلوم المتخصصة والحديثة نسبياً، ولهذا لا توجد مرادفات عربية متداولة لكثير من المصطلحات العلمية (الغربية أساساً) المستعملة في مجال تحلية المياه

(مثـــل "brackishwater"، "brine"، و"flux"). هنـــاك ثلاثـــة أســـاليب متبعـــة في ترجمـــة المصـطلحات العلميـة والتقنيـة. الأول هـو الاحتفـاظ بمنطـوق المصـطلح الأجنبـي وكتابتـه بالحروف العربية، ويعرف اختصاراً بـ *ترجمة الحروف transliteration*. على سبيل المثال يستعمل لفظ "بروتين" محل كلمة "protein" الإنجليزية. الثاني هو ترجمة معنى المصطلح الأجنبي بالعربية، مثل استخدام عبارة "ماء شديد الملوحة" محل كلمة "brine" المستخدمة بكثرة في مجال التحلية. الأسلوب الثالث هو استخدام كلمة عربية أصيلة أو صياغة لفظ عربي جديد مقابل المصطلح الأجنبي، على سبيل المثال استعمال كلمة "دهنيات" مقابل "lipids" أو صياغة لفظ "دخاب" الجديد مقابل مصطلح "smog" الذي يعني الدخان المخلوط بالضباب.P0F[1]

استعملنا الأسلوب الأول عندما لا توجد كلمة عربية معبرة تقابل المصطلح الأجنبي، خاصة إذا ما كان المصطلح الأجنبي متداولاً عالمياً في اللغات المختلفة باللفظ نفسه (مثل "بوليمر polymer").P[2]P1F واعتمدنا الأسلوب الثالث عندما توجد كلمة عربية تقابل المصطلح الأجنبي حتى وإن كانت تلك الكلمة العربية غير متداولة أو مألوفة، مثال "ماء مَسُوس" مقابل "brackishwater"، "أُجَاج" مقابل "brine"، و"إفاضة" مقابل "flux".P[3]P2F لذا نأمل أن يكون هذا الكتاب مفيداً أيضاً للمترجمين التقنيين وكُتّاب العلوم والتكنولوجيا بالعربية.

هناك أساليب متنوعة ودرجات متباينة من تبسيط العلم والتكنولوجيا. والأسلوب الذي اتبعناه هو التركيز على المضامين العملية للقوانين والنظريات العلمية الضرورية لتحقيق أهداف الكتاب، وشرح هذه القوانين والنظريات بالاستعانة بالرسوم التوضيحية والأمثلة البسيطة من خبراتنا اليومية. وقد ابتعدنا عن المقاربات الرياضية لهذه القوانين والنظريات التي لا تخدم الغرض من كتابنا.

---

[1] استعمل الدكتور شريف قنديل مصطلح "دخاب" لأول مرة في العام 1995، ثم أصبح متداولاً بعد ذلك في الكتابات العلمية العربية، وهناك من يستخدم لفظ "ضبخان" بديلاً عنه.

[2] هناك كلمات كثيرة أصبحت عالمية، تتداول في جميع اللغات دون ترجمة مثل "ساندوتش sandawich"، "فلافل flafel"، "أم علي Um Ali"، و"إنترنت Internet".

[3] وردت كلمة "أجاج" بمعنى مشابه في الآية ٥٣ من سورة الفرقان: ﴿وَهُوَ الَّذِي مَرَجَ الْبَحْرَيْنِ هَٰذَا عَذْبٌ فُرَاتٌ وَهَٰذَا مِلْحٌ أُجَاجٌ وَجَعَلَ بَيْنَهُمَا بَرْزَخًا وَحِجْرًا مَّحْجُورًا﴾.

نحن نعُد هذا الكتاب محاولة منا في تحسين جودة الكتب العلمية العربية (ونأمل أن نستطيع إخراجه في طبعة ملونة وجيدة تشجع على قراءته وتساعد على فهمه)؛ فالكتاب مليء بالجداول المختصرة والرسوم التوضيحية الملونة، ويعتمد على أكثر من ١٠٠ بحث ومرجع علمي.

أخيراً وليس آخراً، نأمل أن يُسهم هذا الكتاب في نشر حب التعلم وتقدير العلم وجهود العلماء بين مختلف فئات المجتمع، وإعلاء قيم التسامح، الاحترام، والتعاون فيما بيننا ـ شعوباً، قبائل، طوائف، وأفراداً. فمحطات التحلية التي توفر المياه العذبة لملايين السكان في عالمنا العربي هي نتاج مجهودات باحثين، علماء، ومهندسين من كافة أطياف البشر على مر مئات، وربما آلاف السنين.

سنعرف من قراءة هذا الكتاب أن أول محطة طاقة شمسية في العالم بُنيت في ضاحية المعادي (حالياً أحد أحياء القاهرة) عام ١٩١٢، وأن الذي قام بابتكارها وأشرف على إنشائها هو مهندس ومخترع أمريكي اسمه "فرانك شومان Frank Shuman"، كي تُستخدم في تشغيل آلة بخارية لضخ مياه الري إلى حقول القطن التي كانت في هذه المنطقة. وسنعرف أن تلك التجربة الرائدة وُئِدت قبل أن يمر عام واحد على ولادتها بسبب نشوب الحرب العالمية الأولى.

سنعرف أيضاً أن أولى محطات التحلية وأكبرها أقيمت، وما تزال تقام، في دول الخليج العربي. وقد ساعد الطلب الكبير على تقنيات التحلية في هذه الدول الغنية على خلق سوق نشطة وتنافسية؛ مما أدى إلى تحسينات كبيرة في تقنيات التحلية، ثم إلى انخفاض تكاليف التحلية كثيراً خلال العقود الماضية. وقد شجع ذلك دولاً عديدة، مثل مصر واليونان، على الاستعانة بصناعة التحلية لتوفيراحتياجاتها المائية المتزايدة. وتستطيع هذه الدول أن تستفيد من الخبرات الطويلة للدول الخليجية في هذا المجال.

كل هذا يجعلنا نؤمن فعلاً أن ما يجمعنا كبشر هو أعظم وأهم بكثير مما يفرقنا.

نتمنى لكم رحلة نأمل أن تكون مفيدة وممتعة!

الاختصارات

ت ض ب	تقطير بضغط البخار
ت ل م	تقطير لحظي متعدد المراحل
ت ع	تناضح عكسي
ت م ت	تقطير متعدد التأثير
ت ع م ب	تناضح عكسي لماء البحر
ت ع م م	تناضح عكسي لماء مسوس
ف ك	فصل كهربي
ف ك م	فصل كهربي معكوس
ت م ت	تقطير متعدد التأثير
ج**	جول
چ*	چرام
ج ف م	جزء في المليون
ش اش ا	دول الشرق الأوسط وشمال إفريقيا
م چ	ميليجرام
μ أو μچ	ميكرون أو ميكروجرام
م ص ذ	مواد صلبة ذائبة
م ع م	مواد عضوية متطايرة

ك و	كيلووات
ك و ذ	كيلووات عند الذروة (عند الظروف القياسية)
ك و س	كيلووات. ساعة
ل	لتر
م و	ميجاوات

---

* استخدمنا الحرف "چ" للإشارة إلى حرف الجيم كما ينطق باللهجة المحلية في القاهرة والإسكندرية.

** استخدمنا في الاختصارات حروف خط "تاهوما Tahoma" الكبيرة كمقابل للحروف الإنچليزية الكبيرة (capital letters).

الجـــزء الأول



١. الماء في الوجدان الإنساني

لم أقتل

لم أحرض على القتل

لم أعذب أحدا

لم ألوث النهر

لم أنقص قرابين المعبد

لم أستبح خبز الآلهة

هكذا يتوجه المصري القديم بعد وفاته . إلى الآلهة بالدفاع والدعاء والابتهال، حيث ينفي عن نفسه المعاصي. ونقرأ النص المصاحب لمشهد "الاعتراف" أو "المحاكمة" حيث تتجسد شخوص الأسطورة الأوزيرية في اللوحة الفرعونية، فيقوم "حورس" بتقديم المتوفى إلى أوزيريس الجالس على عرشه وخلفه زوجته أيزيس، يتأملون قلب المتوفى الموضوع على الميزان بينما في الكفة الأخرى ريشة "ماغت" آلهة العدل عند قدماء المصريين (أنظر الشكل ١).

نتأمل كلمات الدعاء وترتيبها، فنجد جريمة تلويث الماء تأتي في مقدمة الكبائر، تأتي مباشرة بعد القتل والتعذيب، بل هي متقدمة على إنقاص قرابين المعبد أو استباحة خبز الآلهة!

يستطرد المصري القديم في دفاعه ودعائه، فيقول لاحقا: "لم أضع نفسي عائقاً للمياه".

هكذا، كان تلويث المياه أو إعاقتها جريمة في حق المجتمع والناس يدفعها الإنسان عن نفسه لحظة الحساب.

الماء في العقائد

هكذا كانت مكانة المياه في عقيدة المصري القديم، بل احتلت المياه مكانة مركزية في كل العقائد، فيغمس الهندوس أنفسهم في مياه نهر الغانج ثلاث مرات عند طلوع الشمس، ويشربون جرعة من مائه من أجل التطهر الروحي، فهو الأكثر قداسة، حيث تقول معتقداتهم إنه نقل من الجنة إلى الأرض. يحج إلى النهر ملايين الهندوس يأتون من كل طبقة - البراهمة والمنبوذون، الملوك والمتسولون، النبلاء والصعاليك لغسل خطاياهم في مياهه، كما يتمنون الموت على ضفافه وذر رماد جثامينهم داخل مياهه.[٤]

أما الماء في الديانة اليهودية فهو للتطهر والاغتسال. ويُعد غسل اليدين قبل الأكل واجباً للتطهر قبل تذوق نعمة الرب، ويستخدم الماء في اليهودية لغسل الموتى قبل الدفن، فهو يطهر الفرد من نجاسات الدنيا وخطاياها.[٥]


Plate 32

الشكل ١: القطعة رقم ٣٢ من بردية آني.[٦]P4F

---

[٤] يعتقد الهندوس أن الاغتسال في مياه نهر الغانج يطهر أرواحهم من الآثام. لكن التلوث الذي يستشري في مياه النهر يمكن أن يسبب ضررا غير محدد لأجساد المغتسلين. وتتنوع أسباب التلوث ما بين مياه الصرف الصحي والجثث المتعفنة ومخلفات المصانع والأسمدة والمبيدات الحشرية، التي تلقى في النهر من عند سفح جبال الهيمالايا حتى خليج البنغال. ويقول الخبراء إن التلوث هو المسؤول عن مجموعة من الأمراض التي تصيب نحو ٤٠٠ مليون شخص، يعيشون في الحوض الفسيح لنهر الغانج. تضم هذه الامراض الالتهاب الكبدي، الدوسنتاريا الأميبية، التيفوئيد، الكوليرا، والسرطان (إضافة من محكِّم الكتاب).

[٥] اكتشفت أحواض خاصة بطائفة الأسينيين المنتشرة في منطقة "خربة قمران" (على الجانب الغربي من نهر الأردن) كانت تستخدم لأداء هذه المراسيم (محكِّم الكتاب).

وفي المسيحية يستعمل الماء للتعميد، إذ يعتقد أنه من الأسرار المقدسة؛ حيث يتم غمر الجسد أو قسم منه بالماء ضمن طقوس كَنسية ليتحقق الميلاد الثاني، ومن خلاله يبقى المرء مسيحياً إلى الأبد. ويعدُّ التبرك بالماء المقدس من الأمور ذات الأهمية والمكانة عند أغلب الكنائس المسيحية.

ويحظى الماء في الإسلام بمكانة كبيرة، فلقد وردت كلمة الماء في القرآن ٦٣ مرة، وغالباً ما كان ورودها بمعنى النعمة، لما للماء من أهمية بالغة، إذ به يتم الوضوء قبل كل صلاة، كما يستعمل الماء للتطهر من الدنَس ولغسل الأموات قبل الدفن.

ويولي المسلمون أهمية خاصة لبئر زمزم الواقع ضمن الحرم المكي (على بعد ٢٠ متراً من الكعبة)، إذ يعتبر ماء تلك البئر مباركاً لما يحمله من معاني دينية، حيث أن جبريل عليه السلام هو من فجر الينبوع بعقبهP٧P5F من أجل سيدنا إسماعيل وأمه هاجر حين تركا في واد لا زرع فيه ولا ماء.

ويتفق العلماء المعاصرون على أن تلويث الماء هو إفساد في الأرض لما يترتب عليه من أضرار جسيمة لكل من يستخدم هذا الماء الملوث من البشر إلى جانب بقية الأحياء الحيوانية والنباتية والمائية، وهو بالتالي أمر محرم نظراً لأن الأديان والأعراف نهت عن الإفساد في الأرض نهياً قاطعاً.

ولقد اهتم العلماء بسن القوانين التي تهدف لحماية الموارد المائية وتنظيم استخدامها بين الأفراد والدول.

---

[٦] "بردية أني" هي مخطوطة من البردي تحوي كتابة هيروغليفية متصلة ورسومات إيضاحية خُطت في سنة ١٢٥٠ قبل الميلاد. فقد كان قدماء المصريين يكتبون على لفائف من البردي لعلية القوم عند موتهم إفادات ورُقيات (اشتهرت باسْم كتاب الموتى) لتساعدهم يوم الحساب في الآخرة. وبردية آني هي كتاب الموتى الخاص بكاتب بلدة "طيبة" المسمى "آني". وقد سرقها السير البريطاني "والس بدج Wallis Budge" في ١٨٨٨ من مخزن الحكومة المصرية، كما اعترف هو بذلك في كتابة "*بطريق النيل ودجلة By the Nile and Tigris*"، وقام بتقطيع اللفافة الأصلية - وطولها ٢٤ مترا - إلى ٣٨ قطعة متساوية الحجم تقريبا لتهريبها إلى المتحف البريطاني حيث مازالت توجد حتى الآن.

[٧] العقب: الجزء الخلفي من القدم

الماء والحضارة

جاء بالكتاب المقدس في وصف الأرض قبل الخليقة "وَكَانَتِ الأَرْضُ خَرِبَةً وَخَالِيَةً، وَعَلَى وَجْهِ الْغَمْرِ ظُلْمَةٌ، وَرُوحُ اللهِ يَرِفُّ عَلَى وَجْهِ الْمِيَاهِ"[8]، هكذا جاءت قبلة الحياة والحضارة من الرب من قلب الماء، فلقد شكل الحصول على مصادر الحياة ركيزة لنشوء الحضارات عبر التاريخ، حيث ازدهرت الحضارات البشرية عبر العصور في وديان الأنهار الكبيرة الرئيسية؛ كما هو الحال في حضارة بلاد الرافدين، والتي تعرف بسم مهد الحضارة، إذ أنها شهدت ازدهاراً بسبب الموقع الجغرافي المتميز بين نهري دجلة والفرات، وقيل أنها سميت بالعراق أي "الشاطئ" لكثرة ووفرة مياهها، التي شكلت عامل جذب للعديد من الأقوام الذين سكنوها وشادوا فيها أرقى الحضارات. كما تركزت حضارة المصريين القدماء على ضفاف مجرى نهر النيل، وينطبق نفس الأمر على حضارات وادي السند في الهند وباكستان، ووادي هوانج في الصين. وهناك عدد من حواضر المدن الكبيرة في العصر الحديث يعود جزء من ازدهارها إلى الموقع الجغرافي المائي المميز، الذي يمكن من الحركة التجارية كما هو الحال في هونج كونج وطوكيو وشنغهاي وروتردام ومونتريال.

وقد انهارت الحضارات عند نضوب موارد المياه أو حين إساءة استخدامها؛ إذ يعتقد كثير من المؤرخين أن سقوط حضارة السومريين في بلاد ما بين النهرين كان بسبب ضعف المهارة والخبرة في عمليات الري حين تركز الملح من مياه الري وتراكم في الأرض والتربة بعد تبخر المياه، وفشل السومريون في تحقيق التوازن اللازم بين تركز الملح في التربة وبين عمليات صرف المياه منها فنضبت الزراعة وتقوضت الحضارة.

ولقد عمل الإنسان منذ فجر التاريخ على تطوير وسائل جلب المياه وطرق تخزينها، فتمكن خلال العصر الحجري الحديث لأول مرة من حفر الآبار الدائمة، حيث كان يرفع الماء إلى الأعلى باستخدام الشادوف أو السواقي أو النواعير. كما انتشرت الآبار المدرجة في عدة مناطق في الهند، بالإضافة إلى وجود نظام تصريف معقد للمياه في بعض المناطق في شبه القارة الهندية، وعثر على نظام تصريف متقن للمياه أيضاً في آثار "سكارا براي Skara Brae" في اسكتلندا، والتي تعود إلى العصر الحجري الحديث. وكانت حضارة الإغريق القدماء في كريت

[8] الإصحاح الأول من سفر التكوين (١و٢).

من أوائل الحضارات التي استخدمت أنابيب من الخزف من أجل تزويد وتصريف المياه. كما استخدم الإغريق في اليونان والأناضول نظام تصريف منزلي على شكل رشاشات مضغوطة لغرض الاستحمام.

وشق الرومان القدماء قنوات لجر الماء، وأنشأوا الخزانات المائية في أرجاء إمبراطوريتهم، ولا تزال العديد من الآثار الرومانية في مجال صرف المياه حاضرةً في العديد من الدول العربية، على سبيل المثال في بلاد الشام وعلى طول ساحل الشمال الإفريقي، حيث تمكن الرومان من إنشاء نظام لجلب وتصريف المياه للمنازل وفي الساحات العامة، وأقيمت النوافير و"السبل" العامة. والمثير أن الرومان القدماء استخدموا الرصاص لصنع الأنابيب، مما أدى إلى انتشار حدوث حالات من تسمم الرصاص في ذلك الوقت.

حفر الفرس أيضاً القنوات المائية في المدن والبلدان، ولقد كان التطور في تقنيات استخدام المياه متزامناً في عدد من الحضارات، حيث تمكن شعب "المايا" في "بالينكي" من تطوير قنوات مائية تحت الأرض، ومن تصميم نظام تصريف شبيه بنظام المرحاض الحديث. ومع تقدم العلوم والتطور في مواد البناء وعلوم الهندسة، بالإضافة إلى تحديث أساليب معالجة المياه، أصبح من الممكن توفير أشكال مناسبة لتخزين المياه وتمديدها إلى البيوت وأماكن الإقامة، بحيث أصبح الوصول إليها سهلاً في العديد من المدن المتحضرة.

استمر التوسع في شق القنوات وحفر الآبار مع ازدهار الحضارة الإسلامية، حيث أُنشئت الترع وحفرت العيون في الطرق والسبل العامة، كما هو الحال في عين زبيدة التي حفرت خصيصاً للحجاج؛ وبرع المهندسون في الأندلس على وجه الخصوص في تصميم النوافير وإيجاد حيل هندسية أضفت لمسات بديعة في فن العمارة كما هو الحال في نافورة بهو السباع بـ "قصر الحمراء" في غرناطة (الشكل ٢).



الشكل ٢: نافورة بهو السباع بقصر الحمراء (غرناطة، الأندلس).

الإنسان والنهر والبحر

علاقة الإنسان بالماء وأنواعه هي علاقة عميقة وأزلية، وعلاقته بالبحر (المالح) تحديداً ومواقفه منه كانت دوماً وما تزال غامضة ومختلطة. فمن ناحية هناك الخوف والرهبة من امتداد البحر السرمدي وقواه المدمرة والمجهول الذي يخبئه، ومن ناحية أخرى يرتبط البحر في وجداننا بروح التحدي والقدرة على الإبداع والتحرر من الهموم والقيود. من منا لم يمر في حياته بهذا الشعور المتضارب عندما يجلس أمام البحر مسترخيا؟ ولقد عبر الشاعر أركيبوس (الذي عاش في القرن الخامس قبل الميلاد) عن ذلك ساخرا:

"لكم هو رائع أن ترقبي البحر من البر

إيه ... إياك والإبحار في السفن!"

وترى "إليشا لندر Elisha Linder" أن علاقة البشر التاريخية بمصادر المياه، والبحر تحديداً، قد مرت بمراحل ثلاثة.P6F[9]

في البداية كانت الرهبة السلبية من البحر هي السائدة. ففي التفكير الشعري الأسطوري للشرق الأدنى القديم كان عنصر الماء يفهم على إنه محيط أولي، أي مكون رئيسي في خلق العالم يرتبط بـ "العالم السفلي". ومن هذه المياه التي تشكلت من عالم الفوضى خرجت الحياة في كل مكان، والبحر أحد مظاهرها. وكان ينظر إلي البحر على إنه تهديد دائم للأرض ومكانها لكنه يتمتع ببعض الخصائص الإيجابية التي يتعين وضعها في الحسبان. وبالمثل فإن المياه العذبة تسقط من السماء، وعلى الرغم من أنها ترافقها السحب والعواصف الخطرة والصواعق، فإنها تجلب البركة للنمو وتنشر الخضرة وتوفر القوت وضروريات الحياة. وفي مصر كان هذا المحيط الأولي يدعى "نون"، وكان يمثل أيضاً المياه الجوفية والنيل، في حين تجسدت قوة الخصوبة التي يملكها الماء في الإله "إنكي" أو "أيا". وفي فلسطين كان هو "تيهوم"، وجه الماء الذي ترف عليه روح الله.[10]

ثم جاءت عملية التبادل بين الثقافات المتجاورة في وقت لاحق وشكلت المرحلة الثانية من علاقة الإنسان بالبحر، والتي بدأت فيها الصلات السياسية الدولية وتبادل الأفكار والمعاني مع تنقل الناس.

أما المرحلة الثالثة، فبدأت عندما بدأ ينمو فهم إيجابي للبحر لدى الناس الذين كانوا يقيمون بجواره وقريباً منه، بعد أن عاشوا في ظل المنافع التي يقدمها لهم البحر: الغذاء الوفير، والمواد الخام اللازمة للصناعات التي نشأت على البحر، والمكاسب الاقتصادية التي تقدمها التجارة البحرية، والأمان النسبي من الغزاة وغيرهم.

وربما نحن نعيش الآن "المرحلة الرابعة" من علاقة الإنسان بالبحر، حيث بدأ الإنسان يرى في البحر مصدراً لمنافع جديدة، مثل المياه العذبة والطاقة. وقد جرت الاستفادة من البحر

---

[9] أنظر إليشا ليندر (٢٠٠٥).

[10] المرجع السابق

كمصدر جديد للمياه العذبة في نهاية القرن التاسع عشر حين كانت تسحب جبال الجليد من المحيط الجنوبي إلى "فالبارايسو Valparaíso" في تشيلي.P7F١١

وقد شهد القرن العشرين العديد من الاقتراحات التي ترى أن من الممكن سحب جبال جليد من القطب الجنوبي إلى المناطق الجافة (مثل السعودية والإمارات)، لكن ارتفاع تكلفتها الاقتصادية والتكنولوجية جعل هذه الفكرة غير قابلة للتنفيذ، فهي تزيد عن تكلفة تحلية ماء البحر (شارليه وشارليه ١٩٩٠: ١١).P١٢P8F وفي الحقيقة تعتبر التحلية بالتجميد إحدى طرق التحلية التي تعتمد على الطاقة الحرارية.F٩١٣

الماء في الأغاني والقصائد العربية

كان للماء حضوراً في الأغنية العربية، وذلك سواء بالفصحى أو بمختلف اللهجات.

فغنى "حليم" بالفصحى "رسالة من تحت الماء" من كلمات "نزار قباني" وألحان "محمد الموجي"، وغنى "عبد الوهاب" بالعامية المصرية "المية تروي العطشان"، كما غنت "فيروز" بلهجة بلاد الشام "عين المي عين" و"ديروا المي"، وغنى "ذياب مشهور" "عالماية عالماية".

وتبارى الشعراء في وصف الماء، فربط بعضهم الماء بالنور والضياء ولمعان الفضة:

"قنديل فضة يضيءُ
ما هو ليلي في الظلالْ يكشفُ
ما هو فجري في الضياءْ
لولاه ما قرأنا وِرْدَ العشقِ
في مقامِ الوصلْ
وما شهدنا الورْدَ
قبل أن يكونَ فكرةً"

---

[١١] أنظر أنطوني لافتون (٢٠٠٥).

[١٢] المرجع السابق

[١٣] أنظر Clayton (2015).

وفي رائعة أيليا أبو ماضي هو أحد عناصر لوحة طبيعة تثري الروح وتبث الرضاء والراحة النفسية:

"كم تشتكي و تقول إنّك معدم

والأرض ملكك والسما والأنجم

ولك الحقول وزهرها و أريجها

ونسيمها و البلبل المترنّم

و الماء حولك فضّة رقراقة

والشمس فوقك عسجد يتضرّم"

وتغنى الشعراء للماء القادم بالخير مع المطر:

"تجيء الغماماتُ من آخر الأفقِ،

ريانةً بالأغاريدِ

تأتي الأغاريدُ من أول الماءِ،

مسكونةً ... بالحصادْ

وتغتسل الروح بالغيثِ،

يبتل شَعْر السنابلِ،

تزهو القُرى والأزقةُ:

فالعامُ عامٌ مطيرٌ

ولا خوفَ من مَرَضٍ أو جرادْ"

وهو العطاء والهدية للحبيبة:

"أحشو جيبي بالماء

أُعقدُه قرطًا

أُهديه إليها"

كما يصف الماء أحوال الحياء:

"إذا قَلّ ماء الوجه قَلّ حياؤه

ولا خير في وجه إذا قل ماؤه"

وتأمله في الطبيعة هو مصدر للعبر والحكم:

"سافر تجد عوضاً عمن تفارقه

وأنصب فإن لذيذ العيش في النصب

إني رأيت وقوف الماء يفسده

إن سال طاب وإن لم يجر لم يطب"

وجاءت إشارات السياسة مسكونة في قصائد الماء، فها هي تصف أحوال الكلام:

"قالت الضفدع قولاً رددته الحكماء

في فمي ماء،

وهل ينطق من في فيه ماء؟"

٢. الماء في الطبيعة وطبيعة الماء

قطرة الحياة

قطرة الماء هي قطرة الحياة، هكذا حدثتنا الكتب السماوية. فقدست التوراة المياه، حيث ذكر "سفر التكوين" أن بداية الخليقة جاءت من الماء: "وَقَالَ اللهُ: لِتَفِضِ الْمِيَاهُ زَحَّافَاتٍ ذَاتَ نَفْسٍ حَيَّةٍ، وَلْيَطِرْ طَيْرٌ فَوْقَ الأَرْضِ ... "، وجاء في القرآن القول الفصل عن الماء شاملاً لكل أنواع الحياة: ﴿وَجَعَلْنَا مِنَ الْمَاءِ كُلَّ شَيْءٍ حَيٍّ أَفَلَا يُؤْمِنُونَ ﴾.[١٤]

وعندما نتأمل في أنفسنا، نجد أن ثلثي وزن جسم الإنسان يتكون من الماء (تتراوح نسبة الماء فيه من ٥٥% إلى ٧٨%، حسب الحجم)، وعندما تنقص كمية المياه في الجسم يشعر الإنسان بالعطش، ويصاب بالجفاف الذي قد يؤدي إلى تعطل بعض وظائف الجسم التي تحتاج الماء كي تعمل بانتظام. ويؤدي عدم شرب كميات كافية من الماء إلى حدوث شعور بالدوار والغثيان واضطرابات في التروية الدموية *perfusion*،[١٥] بالإضافة إلى تشنجات عضلية.

الماء هو الحياة، حيث يتميز بخصائص ضرورية لاستمرار الحياة على وجه الأرض، فهو "مذيب عام"، إذ أن أغلب المواد الحياتية تذوب فيه أو تكون معلقة به، ولهذا الأمر أهمية في التحولات الحياتية، كما يشكل الماء وسطاً حيوياً يسمح بقيام تفاعلات عضوية حياتية تؤدي في النهاية إلى استمرار التناسل وبقاء الكائنات الحية.

يعد الماء أساسياً لحدوث عملية التمثيل الضوئي، حيث تقوم النباتات أثناء هذه العملية بتكوين سكر الجلوكوز مستخدمة طاقة الشمس وثاني أكسيد الكربون والماء. وبالمقابل تستخدم جميع الكائنات الحية ـ نباتية وحيوانية ـ الأكسجين لحرق السكريات (وبقية الكربوهيدرات) من أجل تأمين الطاقة اللازمة لاستمرار الحياة (ويخرج من عملية الحرق هذه

---

[١٤] الآية ٣٠ من سورة الأنبياء.

[١٥] يقصد بالتروية الدموية (١) عملية تزويد الأنسجة الحيوية والخلايا بالأكسجين والغذاء؛ و(٢) عملية نقل ما تنتجة الخلايا من ثاني أكسيد الكربون وفضلات أيضية أخرى بعيداً عن الخلية بوساطة الدم.

الماء وغاز ثاني أكسيد الكربون). ويعمل الماء على تأمين وسط متعادل (لا هو حمضي ولا هو قلوي)، ويضمن عمل الانزيمات بكفاءة. خلاصة القول أن كل الكائنات الحية تحتاج إلى كميات من الماء للقيام بكافة عملياتها الحيوية، إلى جانب التخلص من الفضلات.

ويقوم الماء بالإضافة إلى ذلك بضبط حرارة جسم الكائنات الحية وذلك عن طريق إدماع (تعرق) النباتات أو تعرق البشر والحيوانات.

ويشير الشاعر إلى أن الماء يضبط العمليات الحيوية فيلجأ إليه من تعذر عليه ابتلاع الطعام، ولكن ما العمل إذا تعذر ابتلاع جرعة الماء!

"إلى الماء يسعى من يغص بلقمة

إلى أين يسعى من يغص بماء؟"

وكأن الشاعر يقول إذا كنت ألجأ لصديق لتجاوز عقبة، فلمن ألجأ إذا كان الصديق هو العقبة؟

ماهية الماء وخصائصه الفريدة

"أقام يجهد أياماً قريحته

وفسر الماء بعد الجهد ... بالماء!"

هل يمكن تعريف الماء؟ وهو المعروف لنا جميعا، نستخدمه كل يوم ونشربه كل حين، كيف نعرّفه وهو عديم اللون والطعم والرائحة. وفي الظروف الاعتيادية هو سائل شفاف، يجري أمامنا في الجداول والأنهار ليصب في البحار والمحيطات، كما يتحرك فوقنا على هيئة سحابات وغيامات، ويحيط بنا في شكل ضباب، أو قد يكون متجمداً في أقطاب الأرض على هيئة جليد وأصقاع.P10F[١٦]

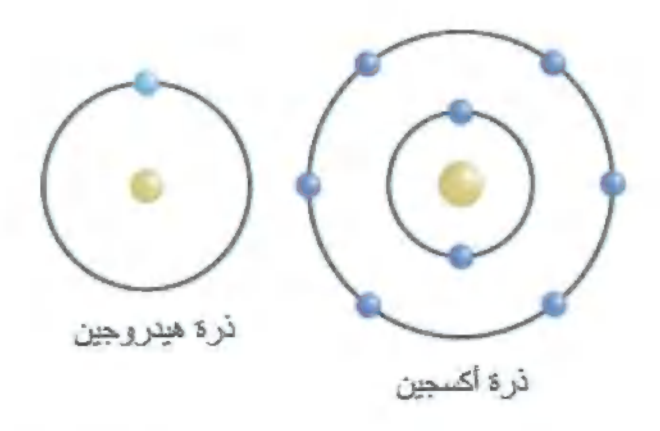
[١٦] الصقيع: الطبقة السطحية من الماء التي تتحول إلى جليد بفعل شدة البرودة، والجمع أصقاع (معجم المعاني الجامع)

جزيء الماء عن قرب

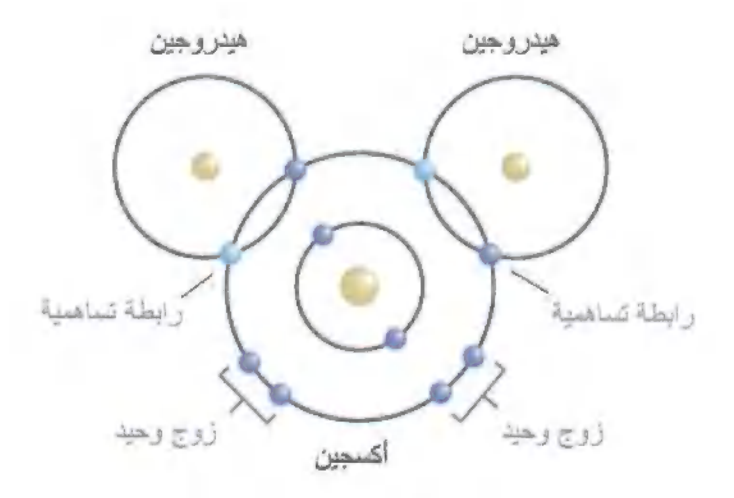
وإذا نظرنا إلى الماء بعين من الكيمياء وأخرى من الفيزياء سنجد أن الماء هو مركب كيميائى بسيط ومعقد في آن واحد، وهو يعد أشهر المركبات الكيميائية على الإطلاق، وأكثرها شيوعاً في الطبيعة.

يتكون جزيء الماء من ثلاث ذرات: اثنتان من الهيدروجين وواحدة من الأكسجين. وكما نعرف تتكون ذرة الأكسجين من ثمانية إلكترونات تدور حول نواة بها ثمانية بروتونات وثمانية نيوترونات، بينما تتكون ذرة الهيدروجين من إلكترون واحد يدور حول نواة مكونة من بروتون وحيد (الشكل ٣).

وفي جزيء الماء تترابط ذرة الأكسجين مع كل واحدة من ذرتي الهيدروجين بـ *رابطة تساهمية covalent bond*، حيث تسهم كل ذرة بإلكترون واحد ليكوّن هذان الإلكترونان الرابطة التساهمية بين الذرتين (الشكل ٤).



الشكل ٣: رسم توضيحي لذرة الأكسجين وذرة الهيدروجين.



الشكل ٤: الروابط التساهمية في جزيء الماء.

وتعبر الصيغة الكيميائية للماء (HR_2RO) عن بنية جزيئاته، ولذا يطلق عليه البعض اسم "أكسيد الهيدروجين hydrogen oxide"، فلقد تعرض غاز الهيدروجين للأكسدة ليكون الماء.

لو نظرنا إلى جزيء الماء في شكله المجسم سنجده يشبه وجه شخصية "والت ديزني Walt Disney" الشهيرة "الفأر ميكي Mickey Mouse"، حيث يقابل ذرة الأكسجين الوجه؛ وذرتي الهيد ب الأذنين (الشكل ٥).

شكل الذرات الثلاثة المكونة لجزيء الماء مثلثاً يحتوي على زاوية بين الرابطتين تساهميتين مقدارها ١٠٤.٤٥° (الشكل ٦).

ولأن ذرة الأكسجين تشد إلكترونات الرابطة التساهمية ناحيتها أكثر، يتكون على جزيء الماء "قطب سالب جزئيا" ناحية الأكسجين وقطب موجب جزئياً عند الهيدروجين، ولذا يُوصَف جزيء الماء بأنه *ثنائي القطبية dipolar* أو ذو خاصية قطبية (الشكل ٧).



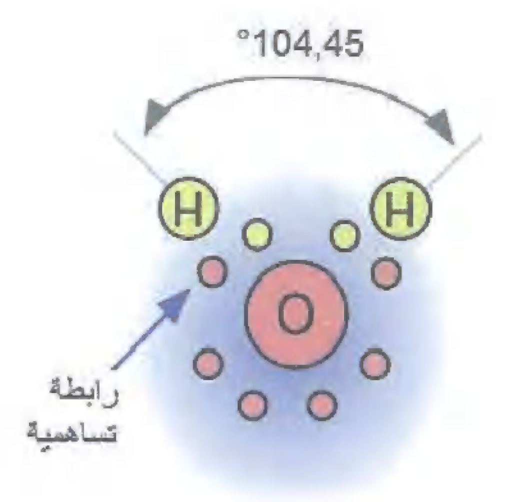
الشكل ٥: تمثيل ثلاثي الأبعاد لجزيء الماء.

وحين تتقارب جزيئات الماء فإن الأقطاب مختلفة الشحنة تتجاذب وترتبط فيما بينها بروابط *كهربية ساكنة electrostatic* تعرف بسم *الروابط الهيدروجينية hydrogen bonds* (الشكل ٨).

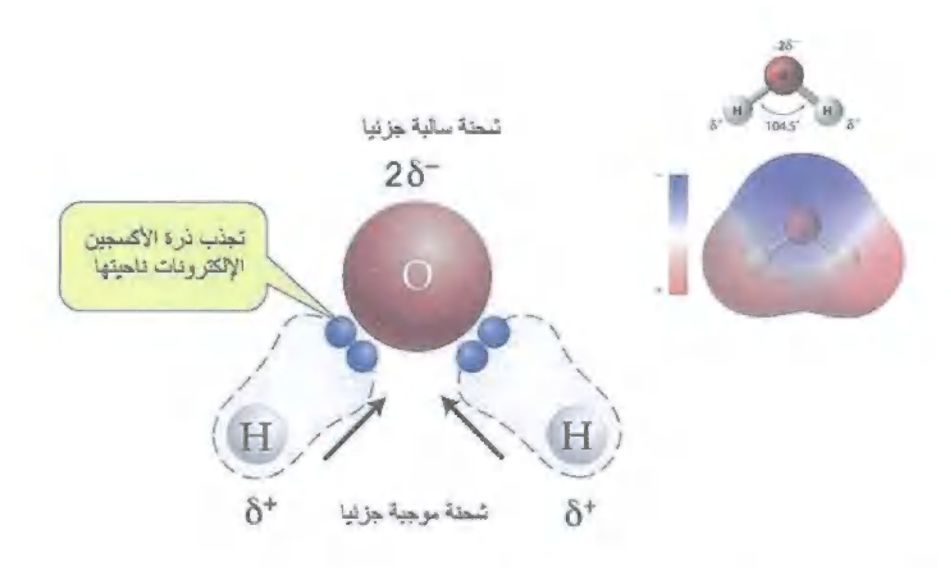
ولقد أعطت هذه الروابط الماء كثيراً من صفاته الفريدة (جدول ١). نجد أن *التوتر السطحي surface tension* في الماء هو أعلى منه في أي سائل آخر (باستبعاد الزئبق)، لذلك تميل المقادير الصغيرة منه إلى تكوين قطرات كروية صغيرة (الشكل ٩).

يتميز الماء كذلك بـ*الخاصية الشعرية capillary action*،P١٧P11F حيث يميل إلى الصعود في الأنابيب الشعرية والشعيرات الرفيعة بشكل معاكس لقوة الجاذبية الأرضية، فيحمل معه الغذاء الذائب فيه من جذور النباتات إلى أوراق الأشجار وثمارها (الشكل ١٠).

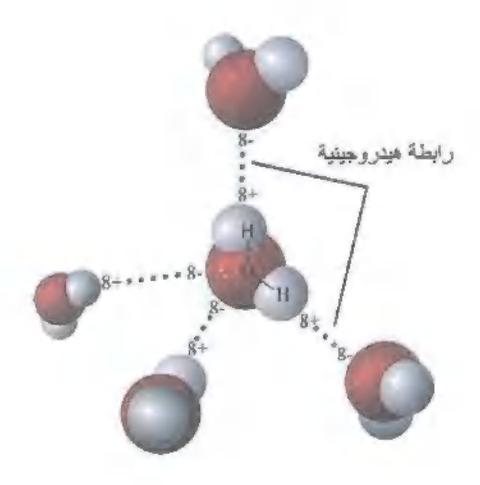
[١٧] الخاصية الشعرية هي قدرة سائل ما على التدفق عبر الفراغات الضيقة بدون مساعدة من، أو حتى ضد تأثير، قوة خارجية مثل الجاذبية الأرضية.



الشكل ٦: الرابطتان التساهميتان في جزيء الماء.



الشكل ٧: الطبيعة ثنائية القطبية لجزيء الماء.



الشكل ٨: الروابط الهيدروجينية بين جزيئات الماء.



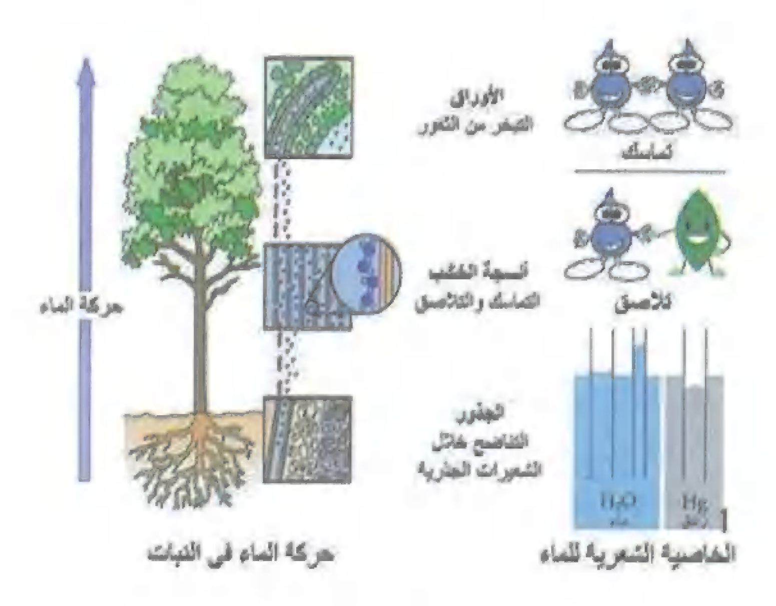


الشكل ٩: التوتر السطحي العالي للماء يجعل المقادير القليلة منه تميل لتشكيل قطرات كروية.

ولعل قطبية الماء هي ما جعلته "مذيباً عاما"، وتعرف المواد الكيميائية القابلة للانحلال (الذوبان) في الماء بأنها مواد *محبة للماء* (*هيدروفيلية hydrophilic*)، مثل الأملاح والسكريات والأحماض والقلويات، وبعض الغازات مثل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون (الشكل ١١). وفي المقابل تعرف المواد الكيميائية التي تكون غير قابلة للامتزاج مع الماء (مثل الدهنيات: الزيوت والشحوم وغيرها) بأنها *كارهة للماء* (*هيدروفوبية hydrophobic*). ويمتزج الماء مع العديد من السوائل كالكحولات (الإيثانول مثلاً) بدرجات مختلفة، ولكنه لا يمتزج مع أغلب الزيوت العضوية، إذ تشكل الأخيرة طبقة أقل كثافة تطفو على سطح الماء (الشكل ١٢).

ماذا يحدث عند تسخين الماء؟

لنفترض أننا قمنا بتسخين ماء مثلج درجة حرارته تحت الصفر بواسطة سخان يبث الحرارة بمعدل ثابت، وقمنا بملاحظة درجة حرارة هذا الماء (الشكل ١٣). سنجد أن حرارة الثلج ترتفع تدريجياً حتى تصل إلى درجة الصفر المئوية (سيليزية، °س)، عندها يبدأ الثلج في الذوبان تدريجيا، ولا ترتفع حرارته عن الصفر حتى يذوب كامل الثلج الذي لدينا. بعد ذلك تأخذ درجة حرارة الماء السائل في الارتفاع تدريجياً حتى تصل إلى ١٠٠°س، وعندها يأخذ الماء في التبخر، ولا ترتفع حرارة الماء ثانية حتى يتبخر كل الماء. السؤال الذي يواجهنا الآن هو أين ذهبت كمية الحرارة التي استخدمت أثناء فترتي الإسالة والتبخر؟ لابد إذا أن تكون هذه الطاقة الحرارية "كامنة" في الماء السائل الذي درجته صفر سلسيوس (في حالة انصهار الثلج) أو في البخار الغازي الذي درجته ١٠٠°س (عند تبخر الماء). ولذلك يطلق على كمية الحرارة الأولى *حرارة الإسالة* (أو *الانصهار*) *heat of fusion* والثانية *حرارة التبخر* (*الكامنة*) *(latent) heat of evaporation*. وربما يفسر ذلك ما يلحظه أخصائيو السلامة المهنية من أن حوادث التعرض للبخار الساخن تسبب أضراراً أخطر من حوادث التعرض للماء المغلي (لا قدر الله).

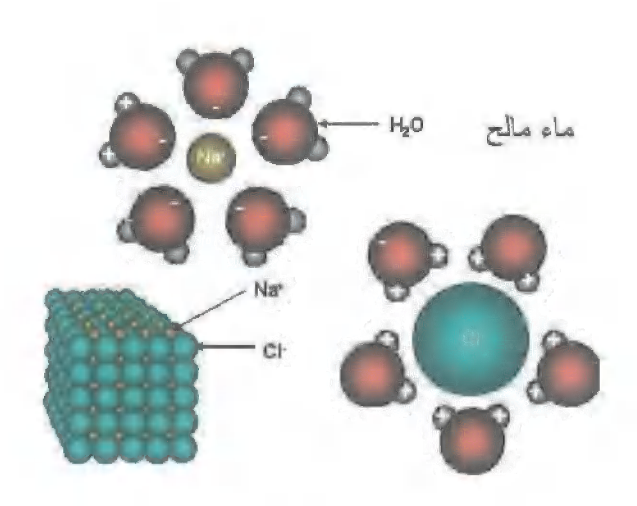


الشكل ١٠: الخاصية الشعرية للماء وآليات انتقاله في الأشجار.

جدول ١: الخصائص الفريدة للماء.

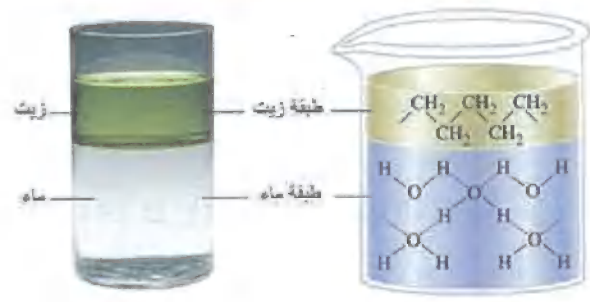
الخصائص	ملاحظات	الأهمية
حالات المادة	يوجد طبيعياً في الأطوار الثلاث: صلب وسائل وغازي	انتقال الحرارة بين المحيط والغلاف الجوي عبر التحول خلال الأطوار الثلاث
قدرة الإذابة	يذيب الكثير من المواد بشكل أكبر من أي سائل آخر	العمليات الكيميائية والفيزيائية والحياتية
الكثافة	تتغير حسب درجة الحرارة والملوحة والضغط (مرتبة حسب الأهمية)، تبلغ قيمتها العظمى عند ٤°س للماء النقي (نقطة التجمد تنخفض مع ازدياد الملوحة)	تتحكم في الجريان العمودي للتيارات المائية في المحيطات، تساهم في توزيع الحرارة والتدرج المائي الموسمي
التوتر السطحي	أعلى قيمة بين السوائل الشائعة	تشكل القطرات؛ أداء وظائف الخلايا الحية
التوصيل الحراري	أعلى قيمة بين السوائل الشائعة	مهمة على نطاق ضيق خاصة على المستوى الخلوي
السعة الحرارية	أعلى قيمة بين السوائل الشائعة	امتصاص التقلبات في درجة الحرارة والحفاظ على اعتدال المناخ
حرارة الانصهار	أعلى قيمة بين السوائل الشائعة	التحكم في الحرارة وضبطها كأثر لانتشار الحرارة عند التجمد وامتصاصها عند الانصهار
قرينة	تزيد مع ازدياد الملوحة وتتناقص	لذلك تبدو الأشياء أقرب في الما

الانكسار	مع ازدياد درجة الحرارة	منها في الهواء.
الشفافية	عالية في المجال المرئي، الامتصاص يتم في المجالين تحت الأحمر وفوق البنفسجي	التمثيل الضوئي
نقل موجات الصوت	جيدة مقارنة بالسوائل الأخرى	قياس الأعماق بالموجات الصوتية
قابلية الانضغاط	ضئيلة	تغير ضئيل للكثافة مع ازدياد العمق
نقطة الغليان والانصهار	مرتفعة	وجود الماء على شكل سائل على سطح الأرض وتحتها



الشكل ١١: رسم توضيحي يبين كيفية ذوبان كلوريد الصوديوم في الماء.





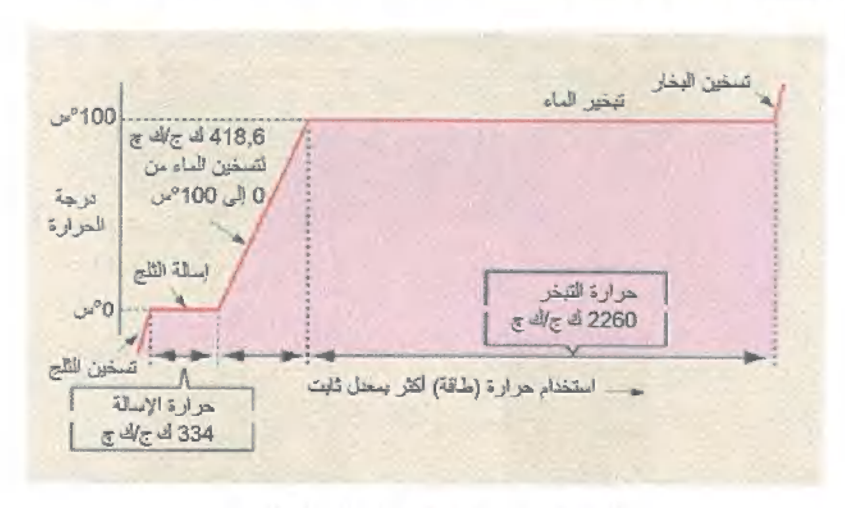
الشكل ١٢: لا يمتزج الماء مع الزيت.

وتتسبب الروابط الهيدروجينية الموجودة بين جزيئات الماء في رفع *السعة الحرارية النوعية للماء*specific heat capacity، فتبلغ ٤.١٨٦ كج/كچ°س (كيلوجول لكل كيلوچرام لكل درجة سلسيوس)،P١٨P12F وهي قيمة مرتفعة نسبياً بالمقارنة مع باقي المركبات الكيميائية الشائعة، وتعتبر حرارة التبخر للماء (٢٢٥٧ كج/كچ) عالية جداً (الشكل ١٤).P١٩P13F وتسهم تلك القيم المرتفعة في جعل مناخ الأرض معتدلاً، وذلك بامتصاص التباينات والتأرجحات الكبيرة في درجة الحرارة، كما تجعل الماء وسيطاً مثالياً لإطفاء الحرائق. لكن نفس

[١٨] الحرارة النوعية هي كمية الحرارة (الطاقة الحرارية) اللازمة لرفع كيلوجرام واحد (وحدة الكتلة) من المادة درجة واحدة سلسيوس.

[١٩] حرارة التبخر هي كمية الحرارة (طاقة) اللازمة لتحويل كيلوجرام واحد (كتلة) من السائل إلى الحالة الغازية دون تغير في درجة حرارة السائل.

هذه القيم العالية تجعل من تبخير الماء عملية تحتاج للكثير من الطاقة ومن ثم مكلفة اقتصادياً وبيئياً، كما سنرى فيما بعد عندما نتعرف على طرق التحلية الحرارية.



الشكل ١٣: خصائص الماء الحرارية.

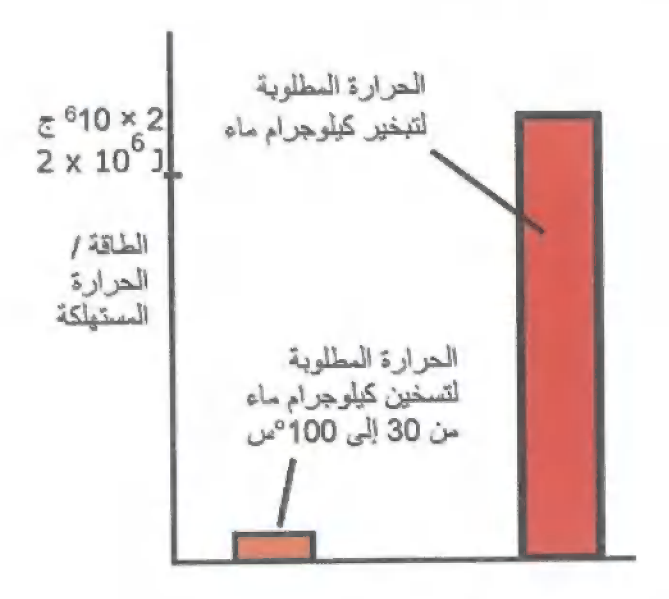
ومن الخصائص الفريدة للماء زيادة حجمه مع انخفاض درجة حرارته عن ٤°س. إذ تبلغ كثافة الماء أقصاها عندما تصل حرارته إلى هذه الدرجة (بالضبط ٣.٩٨°س)، وبعد ذلك تميل للتناقص (بعكس أغلب المواد النقية الأخرى). ولذلك تقل كثافة ماء البحر عند تجمده، فيطفو الجليد المتكون تاركاً المياه أسفله في الحالة السائلة حيث تستمر حياة الكائنات البحرية، ويعبر الشكل ١٥ عن هذه الظاهرة بشكل طريف.

ويعتبر الماء "درع واق shield" ضد مخاطر التعرض للإشعاع النووي، ولذلك يخزن الوقود النووي المستعمل وينقل تحت الماء.

يتواجد لعنصري الهيدروجين والأكسجين *نظائر isotopes* طبيعية وأخرى اصطناعية (تتكون في المفاعلات والتفجيرات النووية). فبالإضافة إلى الهيدروجين العادي أو الخفيف (^{1}HP) يوجد *الديوتيريوم deuterium* (P^{2}PD) بنسبة ضئيلة في الطبيعة (٠.٠١٥%)، وبالإضافة للأكسجين الشائع (P^{16}PO)، يوجد نظيران نادران هما الأكسجين-١٧ (P^{17}PO) والأكسجين-١٨ (P^{18}PO) بنسبة ٠.٠٣٨ و٠.٢٠٠% على التتابع (الشكل ١٦).

ولأن الماء يتكون من الهيدروجين والأكسجين، فإننا نتوقع أن نجد في الطبيعة، بالإضافة إلى الماء العادي (الخفيف)، نسباً ضئيلة من أنواع أثقل. ويبين جدول ٢ أنواع الماء *النظائرية isotopic* ونسب تواجدها في الطبيعة.

ويعرف النوع الذي يحتوي جزيئه على ذرتي ديوتيريوم ($DR_2RP^{16}PO$) بـ*الماء الثقيل heavy water*،P٢٠P14F وهو يستخدم في بعض أنواع المفاعلات النووية (مثل مفاعلات "كاندو CANDU" الكندية و"أتوتشا Atucha" الأرجنتينية)، ويتم الحصول عليه من *تخصيب enriching* كميات هائلة من المياه الطبيعية (أي زيادة نسبة جزيئات $DR_2RP^{16}PO$ في الماء الطبيعي).P٢١P15F وتكون كثافة الثلج المتكون من تجمد الماء الثقيل أعلى من كثافة الماء العادي، ولذلك يغطس فيه (الشكل ١٧).



الشكل ١٤: مقارنة بين الطاقة الحرارية المطلوبة لتبخير كيلوجرام واحد من الماء وتلك المطلوبة لرفع درجة حرارة نفس الكمية من ٣٠ إلى ١٠٠°س.

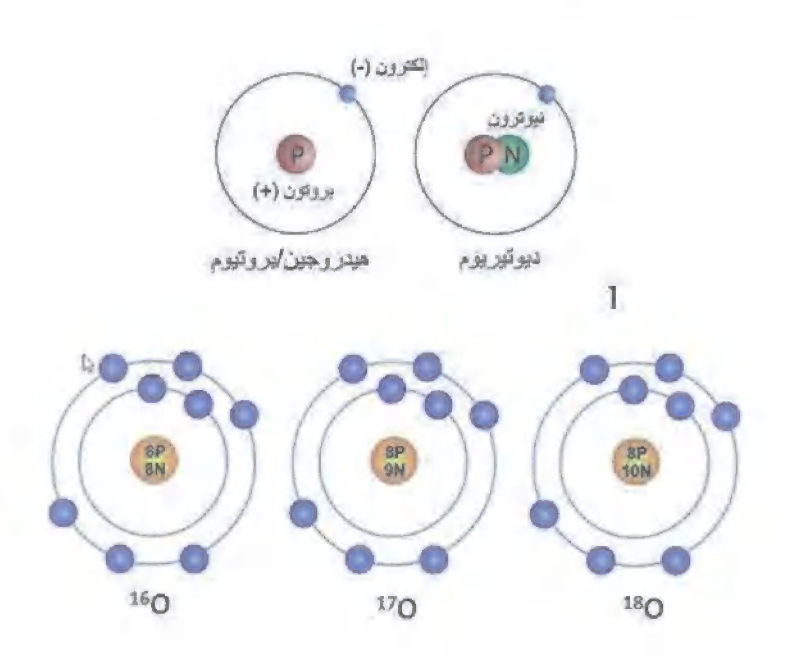
---

[٢٠] درجة انصهار الماء الثقيل وغليانه هي ٣,٨٢ و١٠١,٤°س على التتابع، والماء الثقيل غير مشع.

[٢١] يحتاج الحصول على كيلوجرام واحد من الماء الثقيل تخصيب ٣٤٠ ألف كيلوجرام من المياه الطبيعية. الدول التي تنتج الماء الثقيل هي الأرجنتين وكندا والنرويج والهند، وهي دول تتوافر بها الموارد الطبيعية للمياه العذبة.



الشكل ١٥: شخصيات فيلم الرسوم المتحركة "العصر الجليدي Ice Age".



الشكل ١٦: النظائر الطبيعية للهيدروجين والأكسجين.

جدول ٢: أنواع الماء النظائرية ونسب تواجدها في الطبيعة.

الصيغة الكيميائية	رقم الكتلة	نسبة تواجده (%)
$HR_2RP^{16}PO$	١٨	٩٩.٧٨
$HR_2RP^{18}PO$	٢٠	٠.٢٠
$HR_2RP^{17}PO$	١٩	٠.٠٣
$HDP^{16}PO$	١٩	٠.٠١٤٩
$DR_2RP^{16}PO$	٢٠	٠.٠٢٢



الشكل ١٧: يغطس ثلج الماء. الثقيل في الماء العادي. المصدر: Nova

أهون موجود وأعز مفقود

الماء هو أكثر المركبات انتشاراً في أرجاء الكرة الأرضية، حيث يغطي نحو ٧١% من سطحها. ويوجد الماء في الطبيعة حولنا في حالاته الثلاثة، فهو جليد متجمد في المناطق القطبيه الباردة، وهو ماء سائل يجرى على سطح الأرض في الأنهار والبحار أو في باطن الأرض، أو هو بخار غازي معلق في الجو. ويتحول الماء باستمرار بين هذه الحالات الثلاثة: فقد يتكاثف بخار الماء ويهطل أمطاراً من السماء، أو يتحول إلى قطرات ندى تبلل أوراق النباتات وأسطح الأشياء، وقد يهطل في شكل كرات ثلجية لو صادف انخفاضاً حرارياً. وفي المناطق الباردة قد يتجمد الماء الجاري في فصل الشتاء على شكل كتل ثلجية (تترابط فيها جزيئات الماء وتصطف على شكل بلورات مميزة). وتحدث التحولات العكسية عند ارتفاع الحرارة، فيتفكك الجليد الصلب إلى ماء سائل جاري، ويتحول الماء السائل من جديد إلى بخار متطاير وغيوم فسحاب "ثقال".[٢٢]

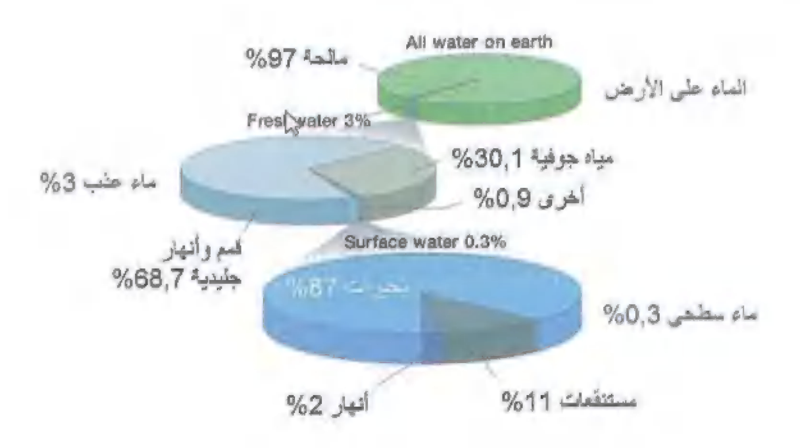
تحتوي البحار والمحيطات على النسبة الأكبر من المياه الموجودة في كوكبنا (٩٧%)، أما جميع صور المياه العذبة فهي حوالي ٣% فقط من مياه الأرض (الشكل ١٨). أغلب هذه المياه العذبة موجودة في الأغطية والجبال الجليدية (٦٩%) وفي المياه الجوفية (٣٠%)، والكمية المتبقية (٠.٣%) موجودة في البحيرات والأنهار والجداول والغلاف الجوي (على شكل سحاب أو غيوم أو ضباب). وهي نسبة تكافئ ١٩٠ ألف كيلومتر مكعب للأنهار والبحيرات، ونحو ١٣ ألف كيلومتر مكعب لبخار الماء في الغلاف الجوي.

دورة الماء

تتنقل المياه الموجودة في الطبيعة باستمرار بين البحر والجو والبر، وتتبدل دوماً أحوالها فهي تارة صلبة وتارة أخرى سائلة أومتطايرة (الشكل ١٩). ينتقل الماء إلى الجو من من بخر المحيطات والمسطحات المائية والأرض المبللة، بالإضافة إلى عملية *النتح transpiration* من نباتات اليابسة (الشكل ٢٠).

[٢٢] السحاب الثقال: السحاب المثقل بالمطر

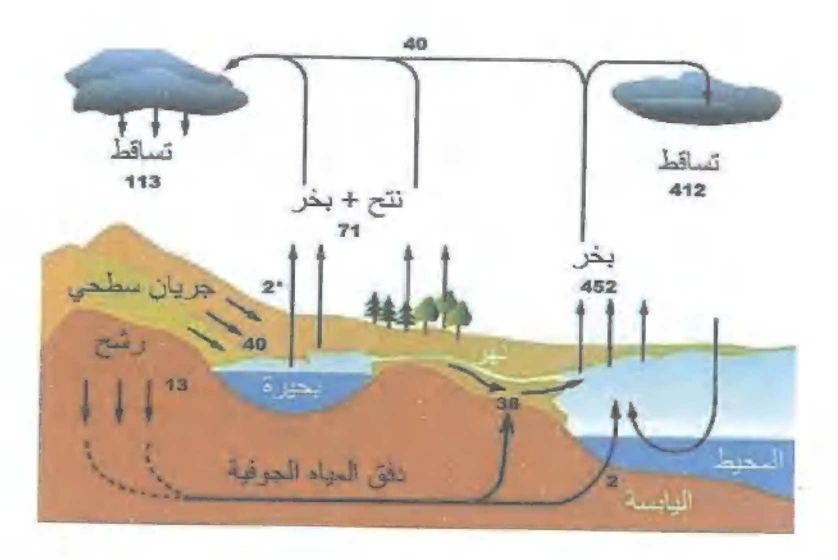
يتكاثف أغلب بخار الماء الموجود فوق المحيطات ويعود إليها، ولكن أحياناً ما تحمل الرياح بخار الماء إلى اليابسة بحيث يمكن أن يحدث الهطول والتساقط عليها، طبقاً للجغرافيا والمناخ، وقد يكون الهطول على شكل أمطار أو ثلج. يتجمع الماء المتساقط في مستنقعات تنجرف إلى الأنهار، أو يرتشح خلال التربة وصولاً إلى المياه الجوفية. تصل المياه السطحية والجوفية في النهاية مرة اخرى إلى المحيطات، وتدور الدائرة.



الشكل ١٨: توزيع الماء على كوكب الأرض.

ويحدث القحط والجفاف عندما تمر فترات زمنية طويلة نسبياً قد تصل لشهور وأحياناً لسنوات دون هطول، مما يؤدي إلى نقصان في المخزون المائي تحت المعدل الطبيعي لتلك المنطقة الجغرافية.

يقوم الماء بدور محوري في التأثير على مناخ الأرض، وهو أساس كافة الظواهر المتعلقة بالطقس وحالة الجو، ويعود ذلك إلى خاصية الماء المتميزة والمتمثلة بالحركية والسعة الحرارية العالية. ويتم تخزين طاقة الشمس في مياه المحيطات، حيث يؤدي ذلك إلى تبخر المياه، إلا أن نسبة التعرض للشمس تتفاوت من مكان لآخر حسب المنطقة الجغرافية، مما يؤدي إلى تفاوت في درجة حرارة المياه وفي نسبة الملوحة، كما يمكن استغلال حركة المياه في توليد الطاقة.



الشكل ١٩: دورة الماء في الطبيعة (الأرقام تعبر عن الكميات بالألف كيلومتر مكعب).



الشكل ٢٠: عملية النتح في النباتات.

ألوان من الماء

يحب المتخصصون في إدارة المياه أن يسموا أنواع الماء بالألوان: فهناك الماء "الأزرق" و"الأخضر"، وحتى "الشاحب"!

الماء الأزرق هو الماء الذي يدور في الطبيعة بين جميع "حلقات" دورة الماء: الغلاف الجوي، اليابسة، المياه السطحية، المياه الجوفية، والبحار والمحيطات. وتقدر كميته بنحو ٤٠ ألف كيلومتر مكعب في العام. وهو النوع الأكبر، وبالتالي الذي تركز عليه عادة جهود إدارة المياه.

أما الماء الأخضر، فيشير إلى المياه التي "لم تذهب أبداً إلى المياه السطحية" أي المياه التي تسقط من الجو وتعود إليه ثانية عن طريق البخر - النتح (البخر من التربة، والبخر والنتح من من أوراق النباتات) أو ترشح مباشرة إلى المياه الجوفية، وتقدر كمية الماء الأخضر بنحو ألفين كيلومتر مكعب في العام.

وهناك نوع من المياه الجوفية انحبس عميقاً في الأرض بين طبقات الصخور (مثل النفط والغاز الطبيعي) منذ زمن طويل (آلاف أو حتى ملايين السنين)، فلم يعد يرى مطلقاً ضوء الشمس، ولذلك يوصف هذا *الماء الأحفوري fossil water* أحياناً بـ "الماء الشاحب pale water". وبالطبع لا يدور الماء الشاحب في الطبيعة إلا بمعدل بطيئ جدا، ولذا تعتبر كميته غير متجددة (بعكس الأزرق والأخضر)، ويتوقع أن تنضب موارده إذا تم استخراجه بكثافة مع مرور السنين. الجدير بالذكر، أن دول الخليج العربي وشمال أفريقيا (مصر وليبيا والجزائر) تمتلك كميات كبيرة من هذه المياه الاحفورية، ويتم تعدينها (استخراجها) بشكل كبير.P16F[٢٣]

أزمة المياه

ماذا نحن فاعلون؟

لمجابهة أزمة المياه نحتاج للتفكير في ثلاث جبهات، أولها: التوعية والتعليم حتى يعلم الإنسان قيمة المياه وينشأ مقدراً لنعمتها محافظاً عليها، حريصاً على نقائها ونظافتها؛ وثاني الجبهات التي يجب أن نهتم بها هي ترشيد استخدام المياه وزيادة كفاءتها وحمايتها من الهدر والتلوث (الشكل ٢١)؛ أما المحور الثالث، فهو تعظيم موارد المياه، والبحث عن مصادر

---

[٢٣] أنظر FAO (2008).

جديدة للماء، وذلك بمعالجتها أو تحليتها (إزالة ملوحتها)، خاصة وأن الماء يحيط بنا، ولكن نحتاج إلى التحايل عليه ليصبح صالحاً للشرب والاستخدام!



الشكل ٢١: "جزيرة فطناس" الغارقة في المياه المالحة (صحراء مصر الغربية)!

الجزء الثاني

مثل الذهب

حالة المياه العربية

مياهم

٣. مياهنا "العزيزة"[٢٤]

الماء وأشكال الحياة

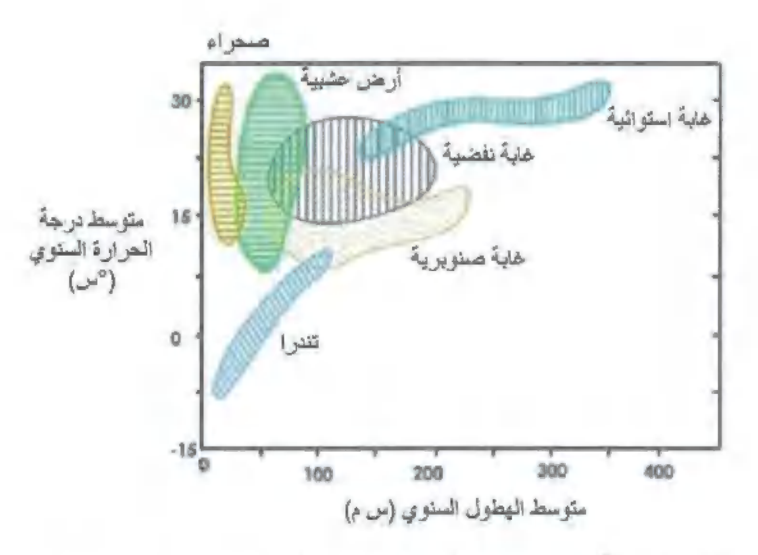
يكاد الماء أن يكون. إن جاز التعبير - "مرادفاً علميا" للحياة. لذا سرعان ما تجدد الأمل لدى بعض العلماء بإمكان وجود أشكال من الحياة على كواكب آخرى غير "الأرض" عند اكتشاف وجود الجليد على كوكب المريخ.

لنعود ثانية إلى كوكبنا الأزرق.

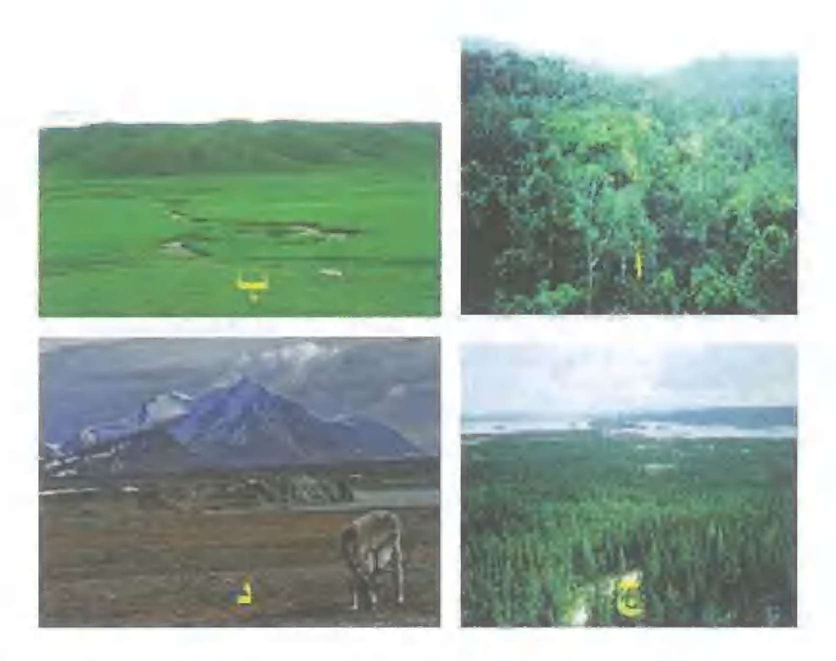
يتحدد شكل "الغطاء النباتي" في أي منطقة من اليابسة، ومن ثم أشكال الحياة الحيوانية والبشرية المصاحبة، بعاملين رئيسيين: (١) *هطول perecipitation* الماء (مطراً كان أم ثلجاً وبَرَداً) و(٢) الحرارة (الشكل ٢٢). فحيث تكون الأمطار وفيرة والحرارة ساخنة نجد الغابات الإستوائية الكثيفة (الشكل ٢٣)، وفي الأماكن شديدة البرودة حيث يقل الهطول نجد *التندرا tundra* الفقيرة المتجمدة (التي يطلق عليها مجازاً اسم "الصحراء الباردة"). ونجد بـ *النطاق المعتدل temperate zone الغابات النفضية deciduous forests* التي ترسم بورق أشجارها صورة مبهجة من الألوان الزاهية قبيل تساقط تلك الأوراق في فصل الخريف (الشكل ٢٤). تمتد *الأراضي العشبية في المناطق تحت الرطبة*، حارة كانت أم باردة. أما *الغابات الصنوبرية coniferous forests* مستديمة الخضرة ذات الأوراق الإبرية فتوجد بالمناطق الباردة حيث يتوفرهطول الثلوج والأمطار.

---

[٢٤] البيانات المتوفرة عن حالة المياه في المنطقة العربية غير حديثة وتتعلق بسنوات مختلفة (١٩٩١ - ٢٠٠٦).



الشكل ٢٢: تأثير الرطوبة والحرارة على شكل البيئة الطبيعية.



الشكل ٢٣: بعض أشكال الغطاء النباتي: (أ) غابة استوائية، (ب) أرض عشبية، (ج) غابة صنوبرية، و(د) تندرا (قطبية).



الشكل ٢٤: غابة نفضية في فصل الخريف.

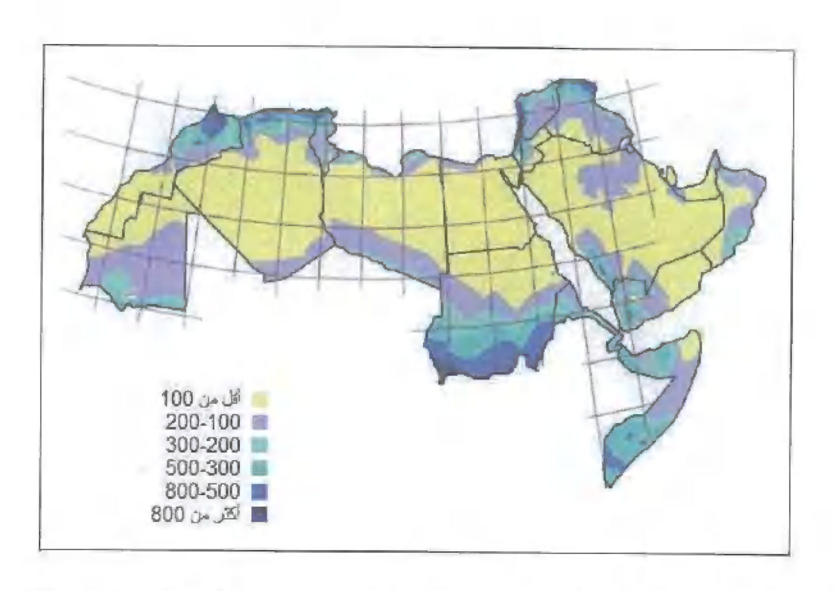
البيئات القاحلة

لا شيء أكثر ألفة للمواطن العربي من منظر الصحراء القاحلة الذي يخلو ـ أو يكاد ـ من أي أثر للون الأخضر. ولا شيء أكثر بداهة له من القول أن وطننا العربي يشغل واحدة من أكثر مناطق العالم جفافاً ـ وسخونة أيضاً (الشكل ٢٥).[٢٥]

يستخدم المتخصصون في علوم الأرض والمياه مصطلح *الأراضي القاحلة drylands* للإشارة إلى البيئات التي تعاني التربة فيها من عجز في المياه. كلنا يدرك بشكل بديهي ما هي هذه الأراضي أو البيئات القاحلة؛ فالتعبير يثير في الأذهان صوراً مألوفة من المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية حيث يشح المطر فتتضاءل الخضرة وسائر أشكال الحياة. لكن العلماء لا يحبون إلا التعاريف الدقيقة البيّنة، فما هو التعريف العلمي للأراضي القاحلة؟

---

[٢٥] نالت "العزيزية" بصحراء ليبيا في يوم ١٣ سبتمبر ١٩٢٢ لقب "أحر بقعة في العالم" عندما اهتز مؤشر مقياس الحرارة الموجود بمحطة للأرصاد الجوية هناك عند رقم ٥٨°س. انتقل اللقب بعد ذلك إلى أماكن أخرى من العالم.



الشكل ٢٥: توزيع مياه الأمطار في الوطن العربي. المصدر: Droubi et al. (2006)

يستخدم المتخصصون في علوم الأرض والمياه مصطلح *الأراضي القاحلة drylands* للإشارة إلى البيئات التي تعاني التربة فيها من عجز في المياه. كلنا يدرك بشكل بديهي ما هي هذه الأراضي أو البيئات القاحلة؛ فالتعبير يثير في الأذهان صوراً مألوفة من المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية حيث يشح المطر فتتضاءل الخضرة وسائر أشكال الحياة. لكن العلماء لا يحبون إلا التعاريف الدقيقة البيّنة، فما هو التعريف العلمي للأراضي القاحلة؟

من الصعب إيجاد تعريف محدد يفصل بين الأراضي القاحلة وتلك غير القاحلة؛ فالطبيعة بتنوعها واتصالها لا تعرف الحدود الفاصلة. وفي الحقيقة لا يوجود تعريف علمي واحد متفق عليه للأراضي القاحلة بل عدة تعاريف متنوعة. لنلقي نظرة الآن على بعض التعاريف المتداولة.

واحد من أبسط هذه التعاريف أنها المناطق التي يقل فيها معدل الهطول عن ٢٥٠ مليمتراً في السنة الواحدة. يؤخذ على هذا التعريف أنه يعتمد على معدل الهطول فقط ويتجاهل العوامل الأخرى التي تؤثر على مستوى جفاف التربة، مثل درجة الحرارة السائدة.

اقترحت اليونسكو في ١٩٧٩ تصنيفاً للنطاقات المناخية يعتمد على النسبة بين معدل الهطول السنوي (*P*) ومعدل *النتح ـ بخر الأقصى* (*PET*) *potential evapotranspiration*، أو ما يعرف اختصاراً بسم *دليل* (أو *قرينة*) *الجفاف* (*AI*) *aridity index*:

$$AI = \frac{P}{PET}$$

يتميز نظام اليونسكو بأنه بسيط ويعتمد فقط على العاملين الأهم في تحديد درجة جفاف التربة: (١) الهطول و(٢) النتح ـ بخر.

تصنف الأراضي القاحلة حسب دليل الجفاف السابق ذكره إلى أربعة فئات: (١) *أراضي تحت ـ رطبة قاحلة dry sub-humid*، (٢) *أراضي شبة جافة semi-arid*، (٣) *أراضي جافة arid*، و(٤) *أراضي عالية الجفاف hyper-arid* أو "صحراء مجدبة true desert" (الشكل ٢٦).

الأراضي الصحراوية (دليل الجفاف ٠.٠٣). تخلو من الخضرة باستثناء القليل من الشجيرات المتناثرة، ولذلك أطلق عليها العرب اسم "البادية". المطر فيها نادر وغير منتظم، وقد تمر عدة سنوات بلا مطر. كمية الأمطار عليها شحيحة. لا تزيد عن ١٠٠ مليمتر إلا نادرا.



الشكل ٢٦: تصنيف الأراضي القاحلة.

الأراضي الجافة (دليل الجفاف ٠.٠٣ - ٠.٢٠). الخضرة المتوطنة ضئيلة وتتكون من الأعشاب، النباتات العشبية، الشجيرات، والأشجار القصيرة. تتفاوت كمية الأمطار كثيراً وتتراوح فيما بين ١٠٠ - ٣٠٠ مليمتر في السنة.

لا تستطيع الأراضي الصحراوية أو الجافة أن تقيم زراعة مستقرة إلا إذا توفرت مصادر كافية أخرى للمياه خلاف المطر، مثل المياه الجوفية كما هو الحال في الواحات النادرة (الشكل ٢٧). ولذلك لم يكن يرتاد هذه المناطق في الماضي سوى الرعاة الرحل وأحياناً بعض قوافل المسافرين عبر الصحراء (الشكل ٢٨).[٢٦]

الأراضي شبه الجافة (دليل الجفاف ٠.٢٠ - ٠.٥٠). تشتمل الخضرة المحلية على تنويعة من الأنواع النباتية مثل الأعشاب، النباتات العشبية، الشجيرات، والأشجار. يتراوح الهطول السنوي فيها ما بين ٣٠٠-٦٠٠ إلى ٧٠٠-٨٠٠ مليمتر أثناء الصيف، وما بين ٢٠٠-٢٥٠ إلى ٤٠٠-٤٥٠ مليمتراً أثناء الشتاء. تستطيع الأراضي شبه الجافة أن تعيل زراعة قائمة على المطر بإنتاج ثابت بشكل عام، كما يمكن أن تتواجد بها تربية مستقرة للماشية.

تتواجد "الظروف القاحلة" أيضاً في بعض الأماكن ضمن *النطاق تحت - الرطب sub-humid zone* (دليل الجفاف ٠.٥٠ - < ٠.٧٥).

تعتبر الأمطار الشتوية في المناطق الحارة أكثر نفعاً للنباتات من الأمطار الصيفية بسبب انخفاض درجة الحرارة ومن ثم مقدار النتح - بخر، والعكس في المناطق شديدة البرودة حيث تتجمد المياه خلال الشتاء.[٢٧]

تستخدم الفاو FAO (منظمة الأغذية والزراعة) معياراً آخراً لتحديد الأراضي القاحلة، هو *طول فترة النمو length of growing period (LGP)*. ويقصد بها المدة من السنة (بالأيام) التي تسمح فيها درجة الحرارة ومستوى الرطوبة بنمو "المحاصيل السنوية" (متوسط درجة الحرارة أعلى من ٥°س أو مساوي لها والهطول يزيد عن نصف النتح - بخر الأقصى، أي *P* >

---

[٢٦] مازالت بعض القبائل تمارس الرعي المتنقل في المنطقة العربية، مثل "الطوارق" في جنوب الجزائر وجنوب غرب ليبيا.

[٢٧] يرتبط المطر في ذهن المواطن العربي بشهر الشتاء؛ لذلك يستخدم المصريون كلمة "تشتي" المشتقة من "الشتاء" كمرادفاً للفعل "تمطر". لكن السماء تمطر في بعض مناطق العالم صيفاً أكثر مما تمطر شتاءاً.

0.5 *PET*). تعرف الفاو الأراضي القاحلة بأنها تلك التي يتراوح فيها طول فترة النمو من ١ - ١٧٥ يوما، وتقسمها وفقاً لنفس المعيار إلى الأنواع الثلاثة التالية: أراضي جافة (١ - ٥٩ يوما)، أراضي شبه جافة (٦٠ - ١١٩ يوما)، وأراضي تحت - رطبة قاحلة (١٢٠ - ١٧٥ يوما).



الشكل ٢٧: واحة الإحساء (أو الحسا)، المنطقة الشرقية، السعودية.

يتضح من المعلومات السابقة أن "الصحراء المجدبة" تشغل تقريباً نصف مساحة المنطقة العربية، وأن نحو ٣٠% أخرى من هذه المساحة تعتبر "أراضي جافة قاحلة".

من أين تأتي مياهنا؟

لم تحول الظروف المناخية الجافة دون أن تشهد "المنطقة العربية" ميلاد العديد من الحضارات الكبرى منذ القدم. لكن لا وجود للحضارة دون موارد للمياه العذبة كافية؛ فمن أين تأتي وكانت تأتي إلى المنطقة الموارد المائية؟[٢٨]

[٢٨] يربط بعض الكتاب بين نشوء حضارة اليمن القديمة ووفرة المياه العذبة، وبين زوال تلك الحضارة وتهدم سد مأرب القديم (راجع AWC 2009).

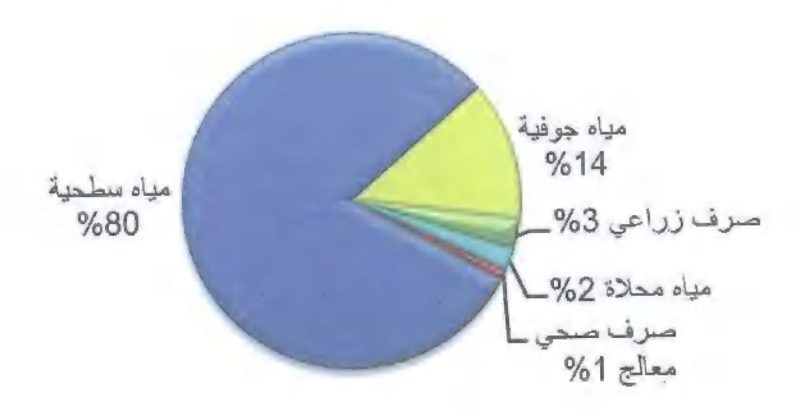


الشكل ٢٨: رسم تصويري لقافلة حجيج قديما.

يصنف المختصون الموارد المائية الحالية إلى نوعين رئيسيين: الموارد التقليدية والموارد غير التقليدية. يقصد بالموارد التقليدية مصادر المياه الطبيعية التي عرفها الإنسان واستخدمها منذ القدم، مثل الأنهار، الينابيع، وآبار المياه الجوفية. وتشمل الموارد غير التقليدية المصادر الاصطناعية التي ابتكرها الإنسان مع تطور معارفه العلمية والتكنولوجية، مثل المياه المحلاة (المنزوع منها الأملاح) ومياه الصرف المعالجة تكنولوجيا.

تستخدم دول المنطقة الموارد التقليدية وغير التقليدية (الشكل ٢٩). تعتمد أغلب دول المشرق، ووادي النيل، والمغرب العربي أساساً على موارد المياه السطحية، بينما تعتمد دول شبه الجزيرة العربية بشده على موارد المياه الجوفية - متجددة وغير متجددة (الشكل ٣٠).[٢٩]

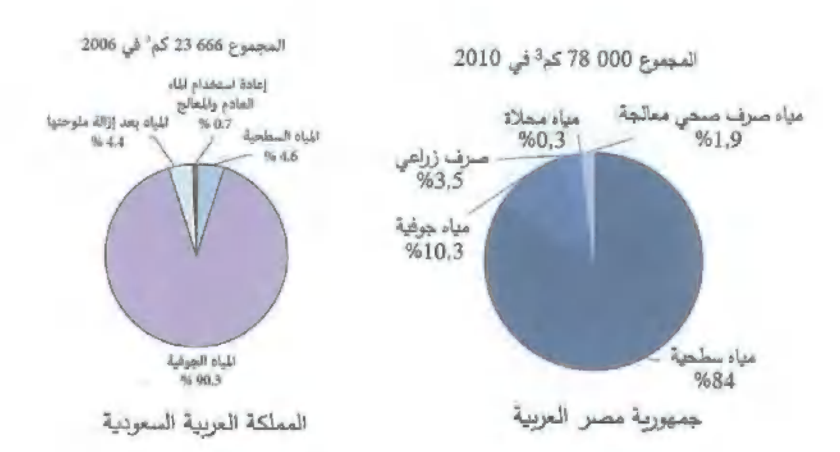
[٢٩] أنظر Al-Zubari (2017).



الشكل ٢٩: موارد المياه العذبة في المنطقة العربية. المصدر: Al-Zubari (2017)

موارد المياه السطحية

يمر بالمنطقة العربية أربعة أنهار كبرى: النيل، دجلة، الفرات، والسنغال. تنبع هذه الأنهار جميعها من خارج حدود المنطقة العربية. بالإضافة لهذه الأنهار الطويلة توجد عدة أنهار قصيرة ومتوسطة، بعضها ينبع ويمر داخل الحدود القُطرية. توجد أيضاً بعض الجداول أو "الوديان wadis" الموسمية في شبه الجزيرة العربية (الشكل ٣١).



الشكل ٣٠: مقارنة بين موارد المياه العذبة في مصر والسعودية. المصدر: مستقاه من FAO's AQUASTAT

لقد أقيمت السدود ومشروعات تخزين وتوزيع الموارد المائية في العديد من بلاد المنطقة منذ القدم. بلغت سعة السدود الموجودة حالياً نحو ٣٥٦ كيلومتراً مكعباً في ٢٠٠٨، أكثر من ٨٦% منها في أربعة دول: مصر، العراق، سوريا، والمغرب.[٣٠]

موارد المياه الجوفية

تشكل المياه الجوفية ثاني أهم المصادر التقليدية في المنطقة العربية. وهي المصدر الرئيسي في العديد من الدول العربية، حيث تساهم بأكثر من ٨٤% من *مسحوبات المياه الأجمالية total water withdrawals* في شبه الجزيرة العربية، وبأكثر من ٥٠% منها في الأردن ولبنان.[٣١] وقد بدأت حتى البلاد التي تعتمد في الأساس على المياه السطحية تلجأ إلى مواردها الجوفية لتساعدها في تغطية عجزها المائي المتفاقم.

---

[٣٠] أنظر FAO' AQUASTAT Database.

[٣١] أنظر (UNDP (2013: 16-17.



الشكل ٣١: وادي مُضَبَة في عُمان بالقرب من مدينة العين الإماراتية.

توجد المياه الجوفية محمولة بين حبيبات طبقات من الصخور المسامية المنفذة للمياه (مثل الصخور الرملية والجيرية). يطلق على الطبقة الصخرية الحاملة للمياه الجوفية اسم *الشعب أو المكمن المائي aquifer* (الشكل ٣٢).[٣٢] والشعب الذي لا يغطيه حتى السطح سوى صخور منفذة يعرف بسم *الشعب غير المحصور unconfined aquifer*. أما الشعب الذي يوجد من فوقه ومن أسفله طبقات من الصخور غير المنفذة (مثل الصخور الطينية) فيوصف بـ "المحصور confined". الجدير بالملاحظة أن مياه الشعاب المحصورة وغير المحصورة هي مياه "متجددة renewable"، أي تدور من خلال دورة الماء بين مكونات الطبيعة الثلاث (اليابسة، الجو، والبحر) بمعدل سنوي ثابت نوعاً ما.

هناك نوع من المكامن المائية العميقة يكون محاطاً من أغلب جهاته بتكوينات صخرية غير منفذة للمياه. يطلق على المياه الموجودة في مثل تلك الشعاب السحيقة اسم *المياه الأحفورية fossil water*، وتُكنّى كما ذكر سابقاً بـ "المياه الشاحبة".[٣٣] وتعتبر المياه الأحفورية *غير متجددة nonrenewable*؛ فقد فقدت جل اتصالها بصور الماء الأخرى منذ آلاف السنين.[٣٤]

---

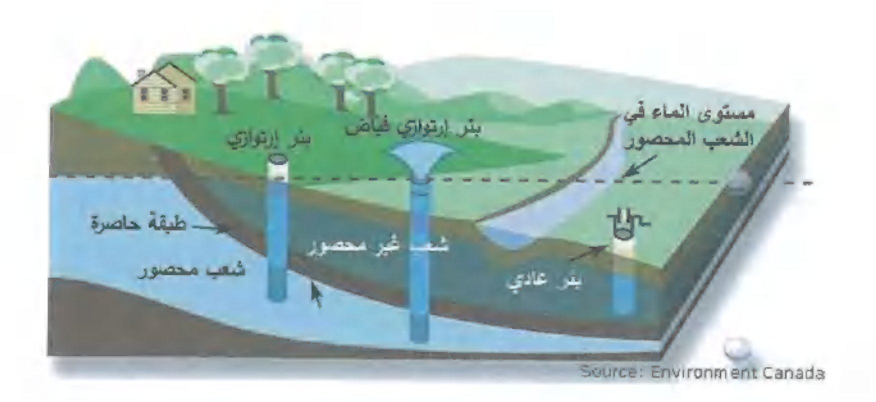
[٣٢] يستخدم البعض مصطلح "الخزان الصخري المائي".

[٣٣] "الأحفورية" كناية عن الفترة الزمنية الطويلة التي بقيت فيها المياه محصورة في باطن الأرض دون تجديد.

[٣٤] التعريف العلمي الدقيق للمياه الأحفورية أنها المياه التي لا تستلم "تغذية" حديثة أو التي تستلم تغذية قليلة جداً مقارنة بحجم مخزونها (كما هو الحال في المياه الأحفورية بشبه الجزيرة العربية).

تتباين نوعية المياه الأحفورية من مكان لآخر كثيرا؛ فتتراوح نسبة الأملاح فيها من ٢٠٠ - ٣٠ ألف مليجرام في اللتر، كما قد تكون مشعة *radioactive* أو حارة *geothermal* في بعض الأماكن (٤٠ - ٦٥°س).[٣٥]

توجد المياه الأحفورية في عدة دول عربية (السعودية، ليبيا، الأردن، وغيرها) ويجرى الاستفادة منها أساساً في ري المحاصيل الزراعية (الشكل ٣٣). ويعتقد المتخصصون أن هذه المياه لم يحدث "تجديد" كبير لها منذ ١٥ ـ ٢٥ ألف سنة خلت.[٣٦]



الشكل ٣٢: أنواع الشعاب (المكامن) والآبار المائية. المصدر: Environment Canada

---

[٣٥] أنظر (UNDP (2013: 17. قد تكون هذه المياه حارة لوجودها في عمق الأرض أو لمرورها بالقرب من صهير *magma*.

[٣٦] المرجع السابق.



الشكل ٣٣: صورة بالألوان الكذبة تبين استخدام المياه الأحفورية في الري بليبيا (مأخوذة بالقمر الصناعي في ٢٠٠٦/٤/١٠).[٣٧] المصدر: NASA (2008)

السحب الجائر للمياه الجوفية

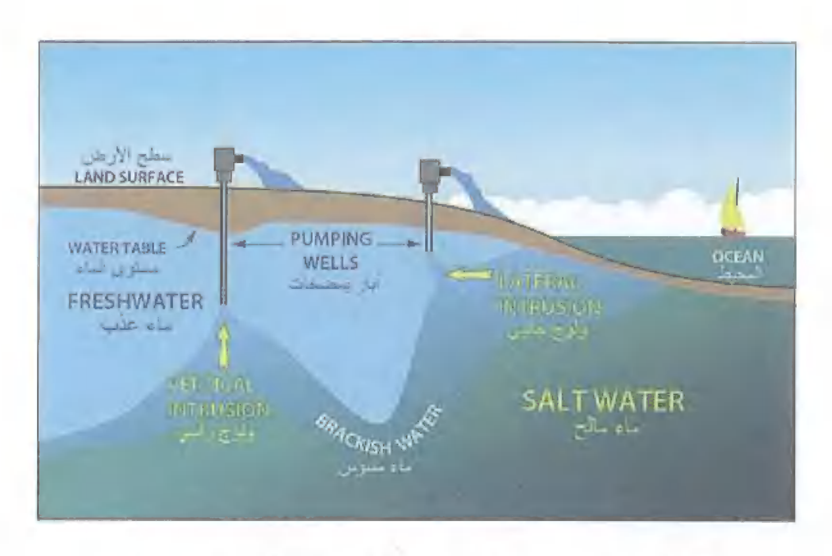
يتسبب السحب الجائر من المياه الجوفية في عدة عواقب سلبية: انخفاض مستوى المياه الجوفية، تملحها، نضوب العيون المائية، وهبوط الأراضي. ويوضح الشكل ٣٤ كيف يحدث تملح المياه الجوفية القريبة من السواحل جراء السحب الجائر منها.

غني عن الذكر أن المياه الأحفورية (غير المتجددة) تتضاءل مع الاستخدام نتيجة عدم تجددها وضعف التغذية الطبيعية لهذه الخزانات. وقد بدأت ليبيا التي اعتمدت بشدة على تلك المياه لأكثر من خمسين عاماً مضت تدرك عملياً هذه النتيجة المنطقية.[٣٨]

---

[٣٧] "الألوان الكذبة أو الكاذبة false colours" هي ألوان تضاف لصور الأقمار الاصطناعية لإظهار معالمها الطبيعية.

[٣٨] توجد هذه المشكلة بعدة دول عربية أخرى مثل السعودية والبحرين.



الشكل ٣٤: تملح المياه الجوفية نتيجة للسحب الجائر.

المياه المحلاة

تتصدر المنطقة العربية العالم في مجال التحلية؛ فهي تنتج أكثر من نصف السعة العالمية.[٣٩] ولأن التحلية هي الموضوع الرئيسي لكتابنا هذا سنكتفي هنا بالإشارة إلى دورها كأحد مصادر المياه العذبة في المنطقة العربية.

رغم ـياه المحلاة لا تساهم سوى بنسبة صغيرة جداً في إمدادات المياه العذبة بالمنطقة عربية (١.٨%) إلا أنها توفر أغلب المياه للكثير من المدن العربية (خاصة الخليجية).[٤٠] تتركز محطات التحلية أساساً في منطقة الخليج (الشكل ٣٥). ووجود هذا العدد الكبير والمتزايد ـن محطات التحلية على سواحل "شبه بحيرة" غير عميقة وشبه مغلقة (الخليج العربي) يتطلب تعاوناً خليجياً أكبر في مجال التحلية. وفي ضوء العجز المائي المتزايد في الدول العربية "النهرية"، مثل مصر، العراق وسوريا، لن يكون هناك مفر من توجه هذه الدول إلى التحلية كأحد الوسائل غير التقليدية الممكنة لزيادة مواردها المائية.

---

[٣٩] أنظر (UNDP (2013: 19.

[٤٠] توفر مياه التحلية، التي تستخدم إما مباشرة أو بعد خلطها بالمياه الجوفية، أكثر من ٥٥% من إمدادات المياه العذبة في دول الخليج (UNDP 2013: 20).

48

تساعد تحلية المياه في تخفيف الضغط على مصادر المياه العذبة التقليدية لكنها تستخدم قدراً كبيراً من الطاقة ولها آثارها البيئية السلبية (سنتناولها بالتفصيل في جزء خاص من هذا الكتاب)، والتي يجب العمل بصدق على تلطيفها.

لقد أوصى "المنتدى العربي للبيئة والتنمية" أن تنشئ الدول العربية برامج مشتركة للبحث والتطوير في مجالي التحلية والطاقة المتجددة وأن تُحسّن الاستفادة من نتائج أبحاث مراكز المعرفة العربية المرموقة، مثل "مدينة مصدر" في أبو ظبي، جامعة الملك عبدالله للعلوم والتكنولوجيا، "مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة"، وبرامج البحث والتطوير الطموحة في "مؤسسة قطر".[41] وفي مصر تم تدشين "تحالف قومي" بين أكثر من ١٠ جهات بحثية وتصنيعية في أكتوبر ٢٠١٦ من أجل التصنيع المحلي لتكنولوجيا تحلية المياه. يشارك في هذا التحالف معهد الدراسات العليا والبحوث بجامعة الأسكندرية، والذي يعمل به الكاتبان حاليا. يوجد بالمعهد في الوقت الراهن فريق بحثي يعمل على تصنيع وتطوير أغشية التناضح العكسي بالإمكانيات المتاحة محلياً وعلى الحد من التأثيرات البيئية المصاحبة لتحلية المياه بهذه التقنية.

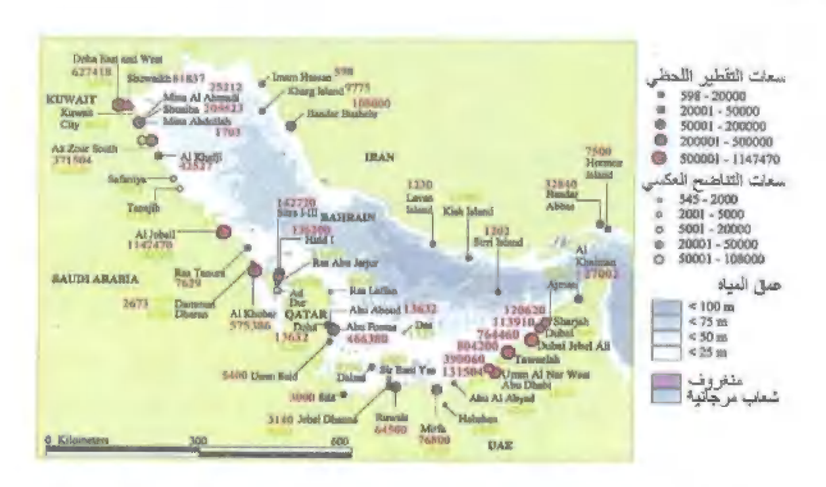
مياه الصرف الصحي المعالَجة

يقصد عادة بـ *مياه الصرف الصحي wastewater* المواد الصلبة والسائلة المختلطة بالمياه التي تصرف على مجاري شبكة الصرف الصحي. تشتمل هذه المياه على مواد عضوية ذائبة ومعلقة "قابلة للتحلل putrescible". كما تحتوى هذه المياه على أعداد هائلة من الكائنات الدقيقة. البكتيريا وغيرها . التي ينتج عن أنشطتها الحياتية تحلل المواد العضوية بهذه المياه. فإذا ما حدث التحلل تحت ظروف *لاهوائية anaerobic*، أي في غياب الأكسجين الذائب، نتجت عنه الروائح والمظاهر الكريهة. وإذا حدث التحلل في وجود مقادير كافية من هذا الأكسجين الذائب تحولت المواد العضوية في النهاية إلى ثاني أكسيد الكربون والماء. لذلك يقال أن للمسطحات المائية قدرة على *التنقية الذاتية self-purification*. لكن لهذه القدرة حدودها. كأي شيء آخر في هذه الحياة. تتلخص "فلسفة" معالجة مياه الصرف الصحي في عزل هذه المياه عن البيئة الطبيعية وتحفيز تحللها الحيوي، ثم صرفها بعد المعالجة بالطرق

---

[41] راجع (UNDP (2013: 24.

والأساليب الآمنة. وتقسم معالجة مياه الصرف الصحي عادة إلى ثلاث درجات: (١) *أولية primary*، (٢) *ثانوية* أو *أحيائية biological* or *secondary*، و(٣) *ثالثية tertiary* أو *متقدمة advanced*.



الشكل ٣٥: محطات التحلية العديدة على ساحل الخليج العربي. المصدر: Latteman & Höpner (2008)

المعالجة الأولية. يقصد بها ترسيب المواد الصلبة المعلقة عن طريق ترك مياه الصرف ساكنة لفترة من الوقت داخل ما يعرف بسم "أحواض الترسيب sedimentation tanks" (الشكل ٣٦).

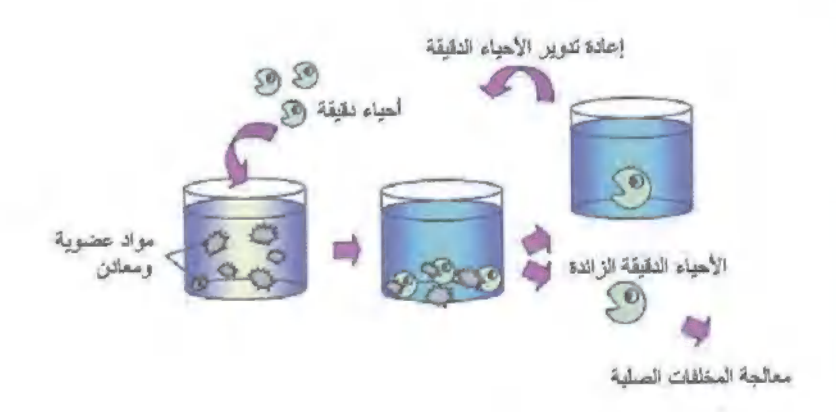
المعالجة الثانوية أو البيولوجية. تنتقل المياه التي ترسبت منها المواد الصلبة إلى مفاعلات المعالجة البيولوجية. وظيفة هذه المرحلة هي إزالة المواد العضوية الذائبة والغروية *المتحللة أحيائياً biodegradable*. ويتم ذلك عن طريق إمداد هذه المياه بالأحياء الدقيقة التي ستقوم بتكسير هذه المواد وبالهواء اللازم لنشاط هذه الأحياء (الشكل ٣٧ والشكل ٣٨):

$$\text{Biodegradable organics} \rightarrow CO_2 + NH_3 + H_2O$$



الشكل ٣٦: المعالجة الأولية في أحواض الترسيب.

المعالجة المتقدمة. قد يراد التخلص من بعض الكيماويات، مثل الفوسفور، النيتروجين، المعادن الثقيلة، والمواد العضوية غير المتحللة أحيائيا، أو تقليل تركيزاتها في المياه المعالجة. في هذه الحالة تمر المياه الخارجة من المعالجة البيولوجية على معالجات إضافية خاصة بالمواد المراد إزالتها أو تخفيضها.



الشكل ٣٧: المعالجة البيولوجية لمياه الصرف الصحي.

نلاحظ تكون ناتجين في كل مراحل المعالجة: أحدهما سائل ويعرف بـ *الصبوب* أو *السّياح* *effluent*، والثاني صلب ويسمى *الحمأة sludge*. يجرى الاستفادة من المياه المعالجة (والحمأة) بعد تطهيرها أو التخلص منها بالطرق الآمنة.

لمقابلة الطلب المتصاعد على المياه في المناطق الحضرية شرعت الدول العربية في استخدام مياه الصرف الصحي المعالجة بشكل متزايد. تنتج الدول العربية نحو ١٣.٢ مليار متر مكعب من مياه الصرف الصحي سنويا، وتعالج نحو ٤٠% منها. تصرف المياه غير المستخدمة على القنوات المائية والبحار والخزانات الأرضية. وتستحق مياه الصرف الصحي في دول الخليج اهتماماً خاصاً للأسباب التالية:

- يمثل "الحضريون" فيها نسبة عالية (نحو ٨٧%) من إجمالي السكان؛[٤٢]
- تعمل محطات المعالجة في أغلب هذه الدول بإمكانيات للمعالجة المتقدمة (مثل محطة "الصليبية" في الكويت ومحطة "النهضة" في أبوظبي بالإمارات)؛
- تستطيع معظم هذه الدول بقدراتها المالية الجيدة معالجة أغلب مياه الصرف الصحي المتولدة.



الشكل ٣٨: أحواض التهوية في محطة معالجة مياه الصرف الصحي.

[٤٢] أنظر UNDP (2013: 26).

كل هذه العوامل تجعل من مياه الصرف الصحي وسيلة ممكنة لتوفير بعض من الاحتياجات المائية لهذه الدول.[٤٣] وتستخدم الدول الخليجية نحو ٤٠% من مياه الصرف المعالجة في ري الأعلاف، الحدائق، والمحاصيل "غير المأكولة". وتصرف نحو نصف مياه صرف البلديات غير المعالجة في الأودية لتغذية المكامن المائية الضحلة أو في البحر مما يسبب تلوث البيئات البحرية والساحلية.[٤٤] ولدى هذه الدول خطط طموحة لإعادة استخدام المزيد من مياه الصرف المعالجة في سبيل مقابلة الطلب المتزايد على مياه الري وتقليل استخراج المياه الجوفية للاستخدامات الزراعية والترفيهية.[٤٥]

تعالج مصر كميات كبيرة من مياه الصرف الصحي خارج وادي النيل وتستخدمها في ري الحدائق والمحاصيل غير الغذائية وتشجير الصحراء.[٤٦] وفي الأردن تُستخدم مياه الصرف المعالجة بعد خلطها بمياه طبيعية في ري ما يقرب من ١٠٦٠٠ هكتار من المحاصيل الغذائية،[٤٧] وهي تساهم بنحو ٢٠% من إجمالي مياه الري.[٤٨] تعالج ليبيا نحو ٤٠ مليون متر مكعب من مياه الصرف (ما يعادل ٧% من مياه الصرف الصحي الإجمالية) وتستخدمها في ري محاصيل العلف وأشجار الزينة والنجيل. أما في تونس فيعاد تدوير نحو ٣٠% من مياه الصرف المعالجة في الزراعة ومجالات أخرى.

تستطيع تقنيات معالجة مياه الصرف الصحي الحديثة تنقية هذه المياه إلى مستوى يتعدى نقاوة المياه الطبيعية، لكن هناك حواجز ثقافية تحول دون التوسع في استخدامها. على كل حال يتطلب هذا التوسع سلسلة من الإجراءات الإدارية المتكاملة، أهمها ما يلي:

---

[٤٣] يمكن توفير نحو ١٢% من احتياجات دولة الإمارات لو تم استخدام جميع مياه الصرف الصحي المعالجة (محكم الكتاب).

[٤٤] أنظر World Bank (2007).

[٤٥] أنظر Al-Zubari (2008).

[٤٦] أنظر Choukr-Allah (2010) وAHT (2009).

[٤٧] الهكتار hectare يساوي ١٠٠٠٠ متر مربع.

[٤٨] أنظر World Bank (2007) وMalkawi (2003).

- تحديد المعايير الفنية ووضع القواعد القانونية التي تضمن الاستخدام السليم والآمن لهذه المياه؛[٤٩]
- تحسين القبول الاجتماعي لاستخدام هذه المياه من خلال الرقابة القانونية الصارمة على التزام مستخدمي هذه المياه بمعايير الآمان الصحي اللازمة؛
- وتشجيع اعتماد المزارعين لمياه الصرف المعالجة من خلال حزمة من الحوافز الاقتصادية الفعالة والمجدية.

طرائق مبتكرة

أجرت عدة دول عربية التجارب على إسقاط أو صنع المطر بواسطة تقنية *بذر السحاب cloud seeding*. كيف يتم ذلك؟

يسقط المطر عندما تتحول قطيرات الماء *فائقة البرودة supercooled* (قطيرات سائلة درجة برودتها أقل من الصفر) إلى بلورات ثلجية. الآن بعد أن أصبحت أثقل من أن تبقى معلقة في الجو تسقط من "السحاب الثقال" متحولة أثناء هبوطها مرة ثانية إلى قطرات سائلة (أمطار). يحتوي الهواء عادة على بعض الرطوبة (الماء)، حتى في المناطق القاحلة. ويمكن تجميع هذه الرطوبة في بلورات ثلجية عن طريق بذر السحاب ببعض الكيماويات (مثل أيوديد الفضة) أو الثلج الجاف، حيث تتكثف قطيرات الماء السائلة على أسطح الحبيبات "المبذورة" متكثفة إلى بلورات ثلجية (الشكل ٣٩).

وهل تنجح هذه الطريقة دائما؟

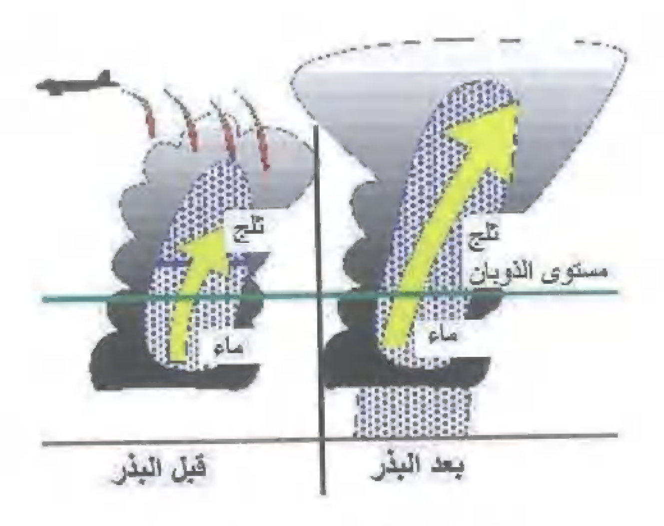
يصعب تأكيد ذلك؛ فكما هو الحال دائماً مع الطقس والمناخ فإنه من المحال التحكم في الظروف التي تجرى فيها التجربة. على كل حال أُعلن عن نجاح التجارب التي أجريت في كل من أستراليا، فرنسا، إسبانيا، الولايات المتحدة، وبعض الدول العربية. وتقول الصين أنها استخدمت تقنية بذر السحاب بطريقة عكسية لجعل أولمبياد بكين ٢٠٠٨ تكتمل دون عوائق من الأمطار الطبيعية!

---

[٤٩] تشير رسالة ماجستير إلى حدوث ١٧ ألف حالة مرضية مرتبطة بالمياه في غزة خلال الفترة من ٢٠١٢ - ٢٠١٤ (راجع Sadallah 2014: 16).

أعلنت الإمارات في مايو ٢٠٠٨ عن نتائج إيجابية لتجارب إسقاط المطر (أُنظر الشكل ٤٠).[٥٠] وفي الأردن زاد هطول الأمطار بنسبة ١٣% بعد ١٠ مواسم مطيرة تبعت تجارب بذر السحاب هناك. كما أظهرت التجارب السعودية المماثلة نتائج أيضاً مبشرة.[٥١] غير أن الأبحاث الحديثة تقترح أن فعالية هذه الطريقة ليست بالدرجة الجيدة التي بدت عليها سابقا.

يتوقع البعض أن يثير التوسع في هذه التجارب قضايا ومشاكل من نوع جديد بين الدول المتجاورة، من قبيل "من يملك تلك السحب الهائمة؟" و"ما هو تأثير بذر السحاب وصنع المطر في منطقة ما على الطقس والمناخ في المناطق الأخرى المجاورة؟".[٥٢]



الشكل ٣٩: إسقاط المطر بواسطة بذر السحاب.

[٥٠] أنظر Kazini (2008).

[٥١] أنظر Al-Fenadi (2001).

[٥٢] أنظر UNESCO (2012).



الشكل ٤٠: جزء من طائرة بذر السحاب فوق مسجد الشيخ زايد الكبير بأبو ظبي. المصدر: المركز الوطني للأرصاد الجوية والزلازل (الإمارات).

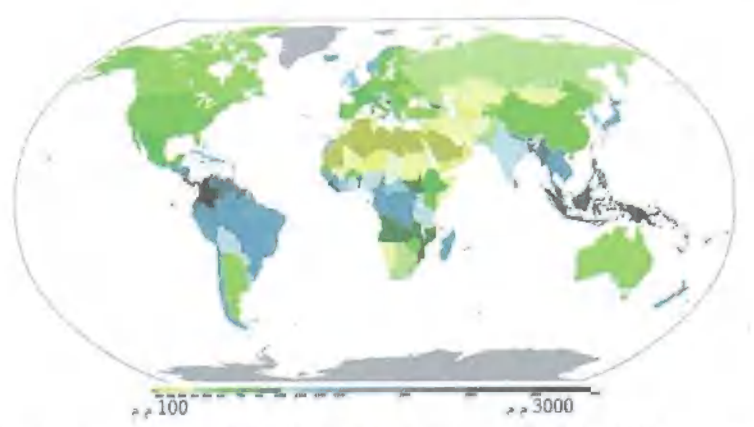
وفرة عالمية وندرة إقليمية

نستطيع تكوين فكرة عامة وتقريبية عن وفرة أو ندرة المياه الطبيعية العذبة في منطقة ما باستخدام مقياس حسابي بسيط: نصيب الفرد القاطن لهذه المنطقة من مواردها المائية المتجددة سنويا. من الواضح أن قيمة هذا المقياس تتوقف على عاملين اثنين: (١) مقدار موارد المياه المتجددة سنوياً في هذه المنطقة و(٢) عدد ساكنيها. وقد تعارف المتخصصون في إدارة الموارد المائية على اعتبار الألف متر مكعب من هذه الموارد للفرد كل عام (١٠٠٠ م^{٣}/فرد/سنة) بمثابة حد "الفقر المائي".

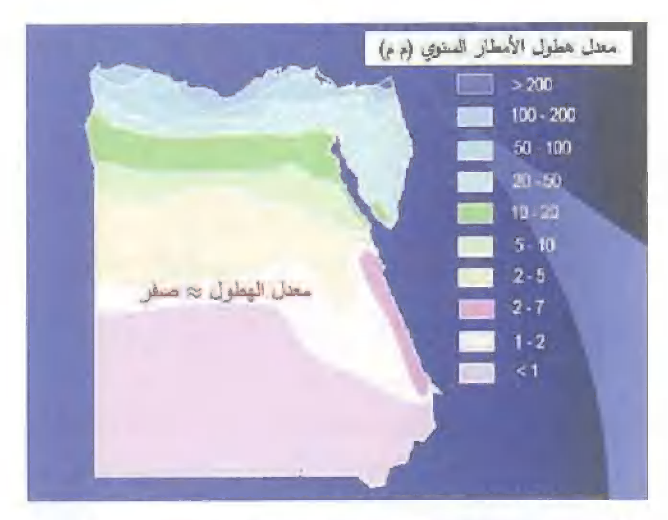
نحن نعرف أن هناك نحو ٤٢ ٩٢٠ كيلومتراً مكعباً من المياه العذبة تدور سنوياً فيما بين اليابسة ـ البحر ـ الجو، وهذه تعتبر نظرياً موارد العالم المائية المتجددة.[٥٣] هذه الكمية مازالت تكفي سكان العالم لو وزِّعت بشكل متساو عليهم. لكن الأمطار لا تتساقط بالتساوي على مناطق العالم المختلفة (الشكل ٤١). فهناك مناطق لا تعرف معنى الأمطار لسنوات طويلة متتابعة (الشكل ٤٢) وأخرى تكاد تغرق تحت زخات المطر المتتالية. وقد تعاني بعض

[٥٣] أنظر FAO's AQUASTAT database.

المناطق الأمرين معا؛ فتعاني الجفاف لسنوات عجاف وتغرق في بعض اللحظات تحت مياه السيول الهامرة (الشكل ٤٣).[٥٤]



الشكل ٤١: متوسط الهطول السنوي على دول العالم (بالمليمتر). المصدر: Wikipedia Commons/Atila Kagan



الشكل ٤٢: معدلات هطول الأمطار السنوية على الأراضي المصرية. المصدر: Abdel-Shafy & Regelsberger (2010)

---

[٥٤] تعرف فيضانات السيول في المناطق القاحلة باسم *الفيضانات اللحظية flash floods* لأنها لا تستمر عادة أكثر من نصف يوم.



الشكل ٤٣: صورة لأحد "فيضانات السيول اللحظية" في السعودية.

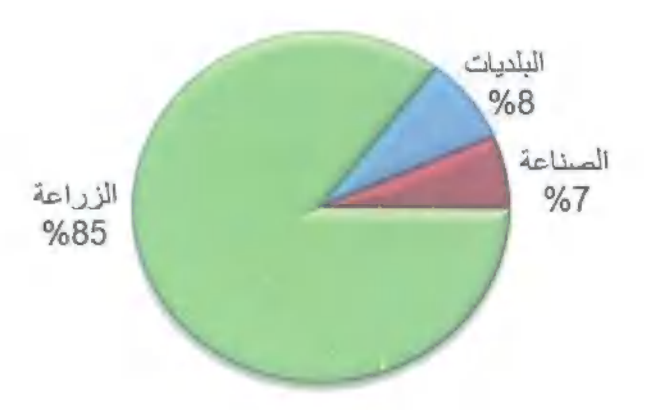
تعاني جميع الدول العربية حالياً من الفقر المائي (ربما باستثناء السودان وسوريا). أساساً نتيجة للزيادة الكبيرة في عدد السكان بداية من منتصف سبعينات القرن العشرين. انخفض نصيب المواطن العربي من موارد المياه المتجددة من ٢ ٩٢٥ متراً مكعباً للسنة في ١٩٦٢ إلى ٧٤٣.٥ فقط (تحت خط الفقر المائي) في ٢٠١١.

استخدامات المياه الحالية

كيف تُستخدم مواردنا المائية حاليا؟

الشطر الأعظم منها (نحو ٨٥%) يذهب إلى الزراعة، والنسبة الباقية تذهب مناصفة تقريباً إلى البلديات والصناعة (الشكل ٤٤). ولا يختلف الوضع كثيراً من دولة عربية لأخرى (الشكل ٤٥).[٥٥]

[٥٥] تفضل الأستاذ الدكتور وليد الزباري بإمدادنا بالبيانات الأحدث التالية (عن ٢٠١٠): السعودية: الكلي ١٧ ٤٤٦ مليون متر مكعب، البلدي ٢ ٢٨٣ (١٣.١%)، الصناعي ٧٥٣ (٤.٣%)، والزراعي ١٤ ٤١٠ (٨٢.٦%)؛ الامارات: الكلي ٤ ٦٠٠ مليون متر مكعب، البلدي ٩٨٣ (٢١.٤%)، الصناعي ٤٧٧ (١٠.٤%)، الزراعي ٣ ١٤٠ (٦٨.٢%). ونلاحظ انخفاضا في نسبة الاستخدام الزراعي في كلا البلدين - بسيطا في السعودية لصالح البلديات والصناعة، وواضحا في الإمارات لصالح الصناعة أساسا والبلديات ثانيا.



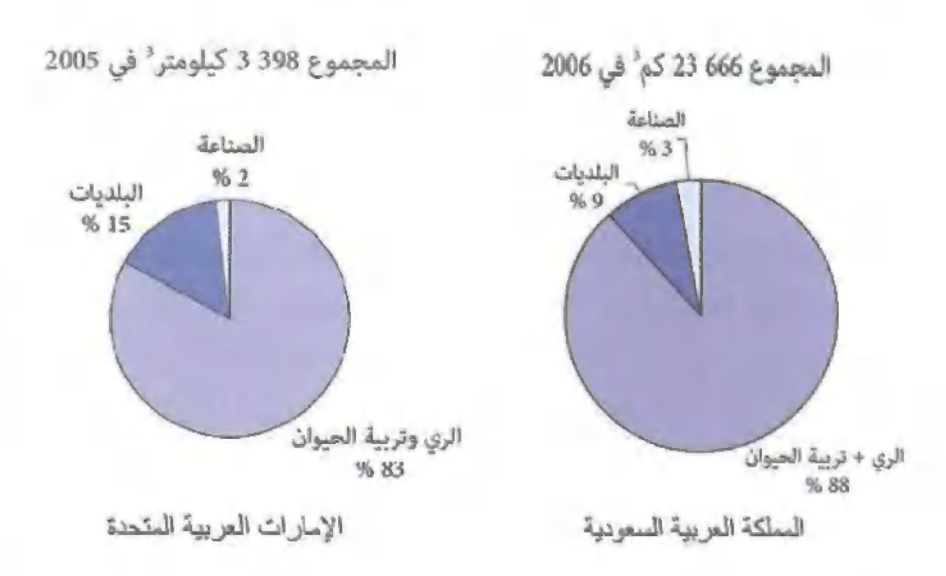
الشكل ٤٤: استخدامات المياه في المنطقة العربية. المصدر: Al-Zubari (2017)

لقد عملت عدة دول خليجية خلال الحقب الأخيرة على تشجيع التوسع الزراعي بأراضيها فوفرت القروض الميسرة ودعمت أسعار الطاقة والمياه المستخدمة في المشاريع الزراعية الحديثة (الشكل ٤٦). أدى التوسع الكبير في هذه المشاريع إلى زيادة هائلة في الطلب على موارد المياه المحدودة بطبيعة المنطقة المناخية والجغرافية.

قد يتساءل البعض عن أسباب هذا الحرص من الدول الخليجية المعروفة بندرة مواردها المائية الطبيعية. وقد وجهنا هذا السؤال الهام لزميل متخصص في موضوعات المياه والأراضي من إحدى هذه الدول، فكان جوابه كالآتي. يرجع ذلك لسببين رئيسيين: الأول هو رغبة بعض المسؤلين في توفير "الأمن الغذائي" لبلدانهم عن طريق تحقيق الاكتفاء الذاتي في المحاصيل الغذائية الأساسية؛ والثاني هو وجود شريحة عريضة من السكان كانت تعمل قبل اكتشاف الثروات النفطية في أنشطة الرعي والزراعة.

في ضوء زيادة حدة أزمة المياه في المنطقة العربية أعادت معظم الدول العربية النظر في حساباتها القديمة (أُنظر الجزء القادم تحت عنوان "التوازن الصعب").

ارتباط مصير المنطقة العربية بإمكانية الحصول على الموارد المائية الكافية هو أمر يعرفه القاصي والداني منذ القدم. قَسم "هيرودوت Herodotus"، المؤرخ الإغريقي الشهير والمكنى بأبو التاريخ، ارتبط كثيراً بمقولته الشهيرة عن مصر والنيل. وقد شبه "ونستون تشرشل Winston Churchill"، رئيس الوزراء البريطاني العتيد خلال الحرب العالمية الثانية، مصر بـ "غواص أعماق يحصل على الهواء من خلال أنبوب النيل الطويل الهش".[٥٦]



الشكل ٤٥: استخدامات المياه في دولتين خليجيتين: السعودية والإمارات. المصدر: FAO's AQUASTAT

[٥٦] أنظر (38-37 :2004) Tvelt.



الشكل ٤٦: المزارع الحديثة في صحراء شبه الجزيرة العربية.

لقد ساعد اكتشاف الثروات النفطية بالمنطقة العربية والبدء في استغلالها في خمسينات القرن الماضي . ساعد الحكومات القائمة على توفير المياه اللازمة لتطور ونمو البلدان العربية. لكن هذه الثروات الجديدة أثارت أيضاً غيرة وحقد البلدان الأجنبية الفقيرة والغنية المعادية. سنتناول في الجزء القادم بشكل موجز وسريع أهم التحديات . والتهديدات . التي تواجه المنطقة العربية فيما يتعلق بتوفير المياه العذبة.

موارد في غير أيادينا

الموارد المائية لا تكترث للحدود الدولية. يأتي أكثر من نصف الموارد المائية المتجددة في المنطقة العربية من خارج حدودها السياسية. ظلت هذه الحقيقة المؤرقة تشكل تهديداً دائماً لبعض بلاد المنطقة . خاصة مصر . منذ قديم الزمن. وتقدم لنا قصتي "قناة جونقلي Jonglei Canal" العتيقة و"سد النهضة Renaissance Dam" الجديد أفضل الأمثلة على هكذا تهديد.

تعود فكرة قناة جونقلي إلى بدايات القرن العشرين حين قام "السير وليام جارستِن Sir William Garstin" بفحص المسار الكامل لنهر النيل بهدف اكتشاف وسيلة لزيادة موارد مصر المائية.[٥٧]

تدخل مياه "النيل الأعلى" إلى مستنقعات السُد الشاسعة (جنوب السودان) حيث تُفقد معظمها نتيجة لتبخرها وامتصاصها بواسطة النباتات المائية (الشكل ٤٧). وقد اقترح جارستن تحويل مسار هذه المياه بعيداً عن منطقة السد بحفر قناة ما بين "بور Bôr" (مدخل المياه إلى منطقة السد) و"وصلة السوباط Sobat junction" (عند اتصال "نهر السوباط" بـ "النيل الأبيض") بالقرب من مدينة "ملكال Malkal" (الشكل ٤٨). ووفقاً للقياسات التي أجريت في ذاك الوقت فإن النهر يكون عند النقطة التي يغادر منها منطقة السد أقل بنسبة ٥٠ - ٨٠% مما كان عليه عند دخوله إليها.[٥٨]

وقد وصف "وُلِس بدج Wallis Budge" في كتابه التليد عن السودان (زمن الاحتلال البريطاني) أعمال جارستن بعبارات تستحق منا الاهتمام والتأمل:[٥٩]

> تظهر نتيجة أعماله [أعمال جارستن] أن مصير مصر مرتبط بمصير السودان، وأن القوة التي تسيطر على مصر يجب أن تسيطر أيضاً على السودان، لسبب بسيط هو أن وجود مصر ذاته واقع في قبضة من يسيطرون على مياه أعالي النيل وروافدها العظيمة.

---

[٥٧] أنظر (484 :1907) Wallis Budge. كان جارستن يشغل منصب المفتش العام للري في وزارة الأشغال العامة المصرية.

[٥٨] المرجع السابق

[٥٩] المرجع السابق



الشكل ٤٧: مستنقعات السد في "جنوب السودان".

عبارات قوية! على كل حال، ولاختصار القصة الطويلة، لم يبدأ العمل الفعلي في القناة المنتظرة، التي أصبحت تعرف بقناة جونقلي، إلا في ١٩٧٨ لكنه لم يكتمل أبدا؛ توقف العمل بالمشروع في ١٩٨٣ بسبب اندلاع الحرب في جنوب السودان. تركت الحفارة الألمانية العملاقة في مكانها تواجه مصيرها لوحدها بعد أن أنجزت نصف مهمتها وحفرت من جهة الشمال لمسافة ١٨٠ كيلومتراً خلال ست سنوات من العمل الشاق في وظيفتها الأخيرة.[٦٠] أصيبت "ذات السطول" بصاروخ خلال الحرب، لكنها بقيت صامدة لتصبح واحدة من المعالم الأثرية الشهيرة بجنوب السودان (الشكل ٤٩ والشكل ٥٠).[٦١] وبعد الاستفتاء المعروف في ٢٠١١ إنفصل "جنوب السودان" عن الجسم العربي ليصبح دولة مستقلة بسم جمهورية جنوب السودان.

[٦٠] جلب السودانيون هذه الحفارة الشهيرة من باكستان حيث حفرت هناك قناة طولها ١٠١ كيلومتر تصل بين نهري "تشاسما Chasma" و"جيلم Jhelum"، وذلك بعد أن تمت إعادة تأهيلها .

[٦١] "ذات السطول bucketwheel" هو نوع من "الحفارات excavators" يستخدم في شق القنوات المائية.

أما مشروع "سد النهضة الأثيوبي Grand Ethiopian Renaissance Dam" الجديد القديم فقصته شائكة وتستحق بمفردها كتاباً كاملاً. لقد طرح هذا المشروع على موائد المفاوضات السياسية والنقاشات الأكاديمية قضايا مصيرية تمس الأمن القومي العربي وتهدد السلام العالمي: من يملك حقوقياً الثروات المائية المشتركة، ومن يتحكم فعلياً في تلك الثروات؟ وللدكتور بطرس غالي، الأمين العام (المصري) الأسبق للأمم المتحدة، في هذا الموضوع تحذير معروف بأن الحروب القادمة في الشرق الأوسط لن تكون على النفط بل المياه.

يتذكر أحد الكاتبين بهذه المناسبة حواراً عابراً دار بين مجموعة من الزملاء الأفارقة في مقرر دراسي بـ "جامعة تونتى University of Twente" الهولندية في ٢٠٠٣. وقد حاجته خلال هذا الحوار مهندسة أوغندية في حق "دول أعالي النيل" في امتلاك مياهه إذ قالت "أنتم [العرب] تملكون النفط وتبيعونه لمن يحتاجه، ونحن لدينا المياه وعليكم أن تشتروها منا إن احتجتموها." تراجعت الزميلة الأوغندية سريعاً عن موقفها هذا بعدما ذاب "جبل الجليد" الذي يوجد عادة بين أفراد الجماعة الجديدة. المثير للعجب والانتباه في هذا الصدد أن ما يعرف بسم "المؤتمر الدولي السادس عن الدراسات الأثيوبية" انعقد في تل أبيب في ١٩٨٠،[٦٢] وبعد ذلك بنحو ٢٥ عاماً نظم الإسرائيليون مؤتمراً خاصاً آخر عن نهر النيل!

أعلن الأثيوبيون عن سد نهضتهم الجديدة في فبراير ٢٠١١. حينهاً كانت مصر منهمكة تماماً في معمعة ثورتها الأخيرة.[٦٣] ولم يمر سوى أسابيع قليلة على هذا الإعلان حتى بدأت أعمال تشييده (في شهر أبريل من نفس العام).

على كل حال اعترض المصريون على مشروع السد بعد أن توقع بعض العلماء أن السد قد يعرقل تدفق مياه النيل إلى مصر (الشكل ٥١).[٦٤] استند المصريون في اعتراضهم من الناحية القانونية الدولية على اتفاقيتي ١٩٢٩ و١٩٦٩ التي تقر بـ "حقوقهم الطبيعية والتاريخية natural and historic rights" في مياه النيل، وتعطيهم حق الاعتراض على المشاريع

---

[٦٢] أنظر Goldenberg (1986).

[٦٣] ليس من الواضح هل كان المسئولون المصريون على علم مسبق بهذه الخطوة أم أنهم قد تفاجأوا بالإعلان.

[٦٤] أكثر من أربعة ـ أخماس المياه التي تصل إلى مصر تأتي من أثيوبيا.

الضارة بهذه الحقوق التي يزمع إنشاؤها في أعالي النهر.[٦٥] تمسك الأثيوبيون بموقفهم السابق الذي يرفض الاعتراف بهاتين الاتفاقيتين على اعتبار أن الأولى تمت زمن الاستعمار البريطاني لبلادهم وأن الثانية لا تعنيهم في شيء، فهي بين مصر والسودان. استمرت أعمال الإنشاء على قدم وساق ويتوقع أن تكتمل قبل نهاية ٢٠٠٧، ليصبح السد الأثيوبي الجديد أكبر سد يتم بنائه حتى الآن في إفريقيا (الشكل ٥٢).



الشكل ٤٨: مسار القناة التي اقترحها جارستن. المصدر: Wallis Budge (1907)

---

[٦٥] الاتفاقية الأولى هي "اتفاقية مياه النيل Nile Waters Agreement" الأنجلومصرية؛ الثانية هي "اتفاقية الانتفاع الكامل بمياه النيل Agreement for Full Utilization of Nile Waters" بين مصر والسودان.



الشكل ٤٩: الحفارة الألمانية العملاقة.



الشكل ٥٠: "ذات السطول" عن قرب.



الشكل ٥١: موقع سد النهضة في أعالي النيل. المصدر: IWRA (2016)

الجدير بالملاحظة أن مثل هذه "المعضلة الأمنية الماء- سياسية hydropolitical security dilemma" لا تخص مصر والسودان فقط بل كل الدول العربية التي تقع في أحواض الأنهر العابرة للحدود الوطنية مثل دجلة، الفرات، ونهر الأردن.[٦٦]

لقد أصبحت "السياسة المائية hydropolitics" من الموضوعات النشطة التي تتناولها في أفضل جامعات العالم الكثير من الأبحاث العلمية والرسائل الجامعية، ويُكتب حولها العديد من أفضل الكتب الأكاديمية.[٦٧] وربما يرجع هذا الاهتمام الملحوظ إلى الخوف من أن تتحول الخلافات السياسية المتصاعدة بين الدول حول مصادر المياه إلى صراعات حربية.

---

[٦٦] أنظر Tayie (2017: 603).

[٦٧] أنظر على سبيل المثال Tayie (2017: 599-654)، Arsano (2007)، و Collins (1990).



الشكل ٥٢: سد النهضة الأثيوبي الذي يرتفع ١٧٠ متراً ويمتد ١.٨ كيلومتر.

التوازن الصعب

التوازن equilibrium هو من المفاهيم المحورية في مختلف فروع المعرفة العلمية. وفي علم الاقتصاد يحدث التوازن في أسواق السلع الاعتيادية عندما تتساوى الكميات المعروضة مع تلك المطلوبة. الجدير بالذكر أن التوازن ليس وضعاً ثابتاً للأبد بل حالة مستقرة نسبيا.

كان الاقتصاديون المؤمنون بحكمة "السوق الحرة" يعتبرون *سعر التوازن* مقياساً دقيقاً لقيمة السلعة. أما الاقتصاديون البيئيون حالياً فيعترفون أن هذه السوق قد أخفقت لأنها لم تدخل "التكاليف البيئية" ضمن حساباتها المالية. لنعد سريعاً إلى مياهنا؛ فالماء ليس سلعة عادية، ويصعب تقبل أن يجرى بيعه وشرائه مثله مثل السلع التجارية.

لنراجع بشكل موجز التطور التاريخي للعرض والطلب على المياه العذبة في المنطقة العربية.

رأينا كيف كانت المياه تحظى بتقدير ديني كبير في مصر القديمة. ويقال أن العربي المؤمن كان إذا شرب الماء يقول "الحمدلله الذي جعله عذباً فراتاً برحمته". كان معظم الناس يعملون بالزراعة أو الرعي ويدركون بشكل مباشر ويومي أهمية الماء للحياة وندرته في المنطقة (الشكل ٥٣).



الشكل ٥٣: تصوير فني لأهل البادية وهم يحصلون على احتياجاتهم من المياه النادرة.

مع نمو معارف الإنسان التكنولوجية أصبح التخصص أمراً حتمياً، وأخذت أعداد متزايدة من الناس تعمل بمهن متنوعة غير الرعي والزراعة. وقد فضل أغلب من لا يشتغلون بهاتين المهنتين الإقامة في المدن. من المتوقع أن لا يتمتع ساكني الحضر تجاه المياه، وسائر الموارد الطبيعية، بنفس الحس المرهف لدى أهل الريف والبادية؛ فالإقامة في "البيئات المبنية" لا تسمح للإنسان أن يرى عن قرب المشهد الطبيعي فيتفاعل معه وجدانيا.

أرادت الدول العربية الناشئة حديثاً بعد أن نالت استقلالها أن تحسن سريعاً من أحوال مواطنيها المعيشية وأن تلحق بركب الدول المتقدمة تكنولوجيا. ويبدو أن شبح التبعية للمحتل الأجنبي كان يخيم بشدة على أذهان المسئولين العرب؛ فأرادوا تحقيق الاكتفاء الذاتي في أكبر قدر من السلع الأساسية. ولما كانت غالبية المواطنين تعمل بالزراعة والرعي عمل المسئولون "الجدد" على تشجيع كافة صور النمو الزراعي والصناعي في وقت واحد معا.

زادت أعداد المصانع والمساحات المزروعة، وزاد عدد السكان بشكل أكبر كثيرا. لم تزد كثيراً موارد المياه العذبة (المحدودة بالظروف المناخية للمنطقة)، وانخفض نصيب الفرد منها

انخفاضاً متزايداً. عمل المسئولون على تغطية ذاك العجز المتنامي عن طريق زيادة "المصادر التكنولوجية" عالية الكلفة. وقد نجحت بعض الدول (خاصة الخليجية) حتى الآن بشكل يدعو للإعجاب في توفير هذه الاحتياجات المتنامية.[٦٨] لكن السؤال ذو المليون جنيه (درهم أو ريال) هو هل تستطيع هذه الدول مواصلة ذلك مع تلك الكلفة العالية؟

يطلق المختصون على هكذا توجه اسم "إدارة جانب العرض" ويدعون إلى توجيه الاهتمام اللازم إلى "إدارة جانب الطلب".

لدينا الآن فكرة عن المقصود بإدارة العرض، فما المقصود بإدارة الطلب؟

يعتقد العديد من الباحثين أن الضغط الزائد على موارد المياه الجوفية في المنطقة العربية أدى إلى سلسلة من الآثار البيئية السالبة: انخفاض مستوى المياه الجوفية، تملح هذه المياه، نضوب العيون المائية (الينابيع)،[٦٩] واستنزاف مخزون المياه الأحفورية غير المتجددة (الشكل ٥٤).

يقول المثل الإنكليزي "ما يأتي بسهولة يذهب بسهولة". لذا يعتقد بعض الباحثين أن الحوافز التي قدمتها دول الخليج من أجل تشجيع التنمية الزراعية والتعرفة المنخفضة لمياه الشرب شجعت أيضاً على الإسراف في استخدام المياه.[٧٠] وتشير بعض الدراسات إلى وجود فاقد جسيم في شبكات توزيع مياه الشرب وفي أنظمة الري بالطرق التقليدية.[٧١]

على كل حال وفي ضوء الضغط المتزايد على مواردها المائية المحدودة أعادت معظم الدول الخليجية النظر في سياساتها المائية، الزراعية، والصناعية. أخذت هذه الدول القرارات الصعبة الضرورية للحفاظ على مواردها المائية؛ تخلت عن أحلامها القديمة بتحقيق الاكتفاء الذاتي في

---

[٦٨] يستخدم الفرد المقيم في إمارة أبوظبي يوميا ٥٥٠ لترا في المتوسط، بينما المتوسط العالمي يترواح من ١٧٠ - ٣٠٠ لتر (Khaleej Times 2016).

[٦٩] على سبيل المثال، جفت أغلب الينابيع التاريخية في واحة "تدمر" بسوريا، حيث انفصلت عن الإمبراطورية الرومانية "مملكة تدمر Palmyra" القديمة (٢٦٠ - ٢٧٢ م) والشهيرة بملكتها "الحديدية" "زنوبيا Zenobia" (ACSAD and BGR 2005).

[٧٠] لا تزيد تعرفات المياه في المنطقة العربية عادة عن ١٠% من متوسط التكلفة الحقيقية (Al-Zubari 2017).

[٧١] تصل نسبة الفقد في شبكات التوزيع سيئة الصيانة ببعض المدن العربية إلى ٦٠% (Al-Zubari 2017).

السلع الغذائية وقبلت بالاعتماد على الاستيراد من الأسواق الخارجية. كما حَثت شركاتها النفطية على تطوير بدائل موفرة للمياه في عملياتها الانتاجية، مثل استخدام مياه البحر في غسل آبار النفط. وتأقلما مع هذا التوجه أخذت بعض شركات الأغذية الخليجية الكبرى تنشئ مزارعها الخاصة خارج شبه الجزيرة العربية (الشكل ٥٥). وتقوم معظم هذه الدول الآن بتقليص الدعم الحكومي لقطاع المياه والطاقة تدريجيا.

يحذر بعض المفكرين من أن تفاقم أزمة المياه في الدول الخليجية قد يعيق توجه هذه الدول نحو تنويع مصادر دخولها القومية؛ على سبيل المثال يتطلب استخراج خامات الذهب الموجودة في الأراضي السعودية وتنقيتها وجود مصادر كافية من المياه قد يصعب في المستقبل توفيرها. فهل أصبحت مياه المنطقة العربية أندر حقاً من ذهبها (أسوداً كان أم تبراً)!





الشكل ٥٤: "عين الرحى" بالبحرين في خمسينات وتسعينات القرن العشرين. المصدر: Al-Zubari (2001)



الشكل ٥٥: مزارع إحدى شركات الأغذية الخليجية في الأرجنتين.

تأثيرات سلبية

من الشائع في هذه الأيام أن نجد في أي كتاب تعليمي جزءاً خاصاً بمشاكل التدهور البيئي وعلى رأسها التلوث. نحن نعتقد أن المعالجة المبتذلة لهذا الموضوع تضر أكثر مما تفيد؛ وهي في الأغلب تقسم القراء إلى معسكرين على طرفي نقيض: أحدهما يَحتج بشكل مبالغ فيه على كل تطور تقني، والثاني يتجاهل كلية النتائج السلبية لهكذا تطور. ونحن نرى أن

الأفضل من الاحتجاج المبالغ فيه أو الحماس الزائد للتكنولوجيا الحديثة هو التمييز بين النتائج الجيدة والسيئة التي تصاحبها والعمل على الإفادة إلى أقصى حد من الميزات والحيلولة دون التبعات السيئة.

ما هو *التلوث البيئي*؟ قد يبدو هذا السؤال للوهلة الأولى ساذجاً أو نوعاً من الحذلقة العلمية لا لزوم لها.

لكل تطور تقني جانبه الطيب وجانبه السيئ، مثل كافة الأمور في هذا العالم، ويصاحب كل مشروع تنموي قدر من التلوث. نحن بالطبع لا نرغب في التلوث لكننا نريد في الوقت نفسه الفوائد المنتظرة من هذا المشروع أو ذاك.[٧٢] يساعدنا المفهوم الاقتصادي للتلوث على ايجاد

---

[٧٢] قد تكون الكميات القليلة من بعض الملوثات غير ضارة وربما نافعة (ويقال أن قليلا من السُم قد يفيد).

حل عملي لهذه المشكلة. لا أحد فينا يرغب في العيش في بيئة خالية تماماً من التلوث ومحروماً من كل المنتجات التي توفرها الصناعة والزراعة الحديثة، ولا أحد فينا يرغب في اكتناز هذه المنتجات وهو لا يستطيع أن يتنفس هواء المدينة التي يعيش فيها. إذاً هناك توليفة من المنتجات وجودة البيئة يرغب كل مجتمع في التمتع بها. ويبحث الاقتصاديون البيئيون عن الأدوات المناسبة التي تمكنهم من تحديد هذه "التوليفة المثالية".[٧٣]

تهدف "الإدارة البيئية environmental management" إلى منع التأثيرات السلبية لأنشطة الإنسان أو الحد منها على *البيئة الجَماد. حياتية biophysical environment* بمكوناتها "الحية biotic" (الإنسان، الحيوان، والنبات) و"غير الحية abiotic" (الهواء، الماء، والتربة). و*تقييم الأثر البيئي environmental impact assessment* هو إحدى أدوات هذه الإدارة التي تمكننا من توقع الآثار البيئية و"الاقتصاد. اجتماعية socio-economic" للمشروعات التنموية قبل إنشائها، بهدف تحسين منافعها الاجمالية وتقليل تأثيراتها البيئية السلبية.

نستطيع أن نعود الآن إلى مياهنا ونحن ندرك بشكل أوضح ما المقصود والغرض من إدارتها بيئياً وتكاملياً. تظهر نتائج الدراسات العلمية أن المياه العربية قد تعرضت للتلوث من مصادره المتنوعة (صناعية، زراعية، وبلدية). على سبيل المثال ارتفع مستوى النترات بالمياه في غزة إلى ٦٠٠ - ٨٠٠ مليجرام للتر بسبب التلوث الزراعي والصرف الصحي، وهو أعلى كثيراً من *الحد الأقصى المسموح به maximum allowable limit* (٥٠ مليجراماً للتر).[٧٤]

ناقشنا للتو بعض الآثار السلبية للأنشطة البشرية على جودة مصادر المياه. هناك أيضاً في الاتجاه المعاكس تاثيرات سلبية لمشروعات المياه، مثل السدود ومحطات التحلية، على البيئة الجماد. حياتية. هنا للأسف يختلط العلمي بالسياسي. والمثال الصارخ على هكذا اختلاط يأتي من نهر النيل أيضا، وتحديداً "السد العالي" الذي بناه المصريون في ستينات القرن العشرين (الشكل ٥٦).[٧٥] لقد كُتبت مئات المقالات الأكاديمية عن الآثار البيئية لهذا

---

[٧٣] لتعريف موجز بالمفهوم الاقتصادي للتلوث أنظر الزيات (٢٠١٠).

[٧٤] أنظر PWA (2000). ولمزيد من الأمثلة أنظر UNDP (2013: 29-31).

[٧٥] بدأ تشييد السد العالي في ١٩٦٠ واكتمل بنائه في ١٩٦٨ لكنه لم يفتتح رسميا إلا في ١٩٧١.

المشروع؛ حتى أن هناك مقالتان لباحثين متباعدين تحملان نفس العنوان تقريباً ("زيارة السد العالي من جديد Aswan Dam revisited"): أحدهما هندي المولد كان الرئيس المؤسس لـ "مركز العالم الثالث لإدارة المياه Thrid World Center for Water Management" في المكسيك،[٧٦] والثاني بريطاني. أمريكي كان يعمل أستاذاً للتاريخ بـ "جامعة كاليفورنيا، سانتا بربارا University of California, Santa Barbara" بالولايات المتحدة الأمريكية.[٧٧] ويكاد المرء أن يتوقع موقف الباحث من مشروع السد في تلك الكتابات استناداً على خلفياته العرقية والسياسية.

هناك كذلك كتابات "شعبية" نقدية لمشروعات التحلية في دول الخليج يشعر المرء عندما يقرأها وكأنها تتحدث عن مشروعات "ترفيهية". لا مصيرية!



الشكل ٥٦: السد العالي بأسوان.

[٧٦] أنظر Biswas (2002).

[٧٧] أنظر Collins (2006).

كي لا تغادر المياه مجاريها

للماء وضع خاص وخصوصية "اجتماع - ثقافية socio-cultural" و"حياة - جمادية bio-physical". فهو من ناحية ضرورة حياتية، ومن ناحية أخرى له استخدامات متعددة ترفيهية وربحية. كما أنه مكون حيوي في جميع الأنظمة البيئية. لا يمكننا التعامل مع المياه باعتبارها "سلعة" عامة أو خاصة، إنما يجب التعامل معها على أنها "مورد مشاع common-pool resource" ذو أهمية حيوية. يقول "أرسطو Aristotle" عن الأشياء المشاعة ما يلي:

ما هو شائع بين أكبر عدد من الناس يحصل على أقل قدر من الرعاية. فالناس تعطي معظم الاهتمام لما هو خاص بهم؛ ويقل اهتمامهم بما هو شائع؛ أو يهتمون به في أي حال من الأحوال فقط إلى المدى الذي يعنيهم كأفراد. وحتى عندما لا يكون هناك سبب آخر لعدم الاكتراث، يصبح الناس أكثر ميلاً لإهمال واجباتهم عندما يعتقدون أن هناك أشخاص أُخَر يتولون ذات المهام.

والكثير منا يعرف من تجارب الحياة أن الشراكة التي لا تحكمها القوانين تنتهي غالباً بالفشل وفقدان الصداقة. وفي مجال الإدارة البيئية يعتقد بعض الباحثين أن غياب حقوق الملكية في الموارد المشاعة يؤدي إلى استغلالها بشكل جائر ومن ثم تدهورها نوعياً ونقصانها كمياً. تعرف هذه النظرية في مجال إدارة الموارد والإدارة البيئية بسم "مأساة المشاع tragedy of commons".[٧٨]

عادة ما تعتبر المياه السطحية من الناحية القانونية "ملكية عامة". أما المياه الجوفية فترتبط ملكيتها بملكية الأرض التي تستخرج منها. وأياً كان التوصيف القانوني لهذه الملكية فإنها لا تعطي لـ "صاحبها" حقاً مطلقاً في التصرف كما يشاء فيها وإنما فقط حق استخدام مشروطاً بحسن إدارتها وفقا لقواعد وأسس إنسانية وعلمية مقبولة.

لا توجد دولة في المنطقة العربية لا تتشارك في جزء من مواردها المائية مع غيرها من الدول المجاورة، والأمثلة على ذلك كثيرة:

---

[٧٨] لمزيد من التفاصيل عن هذه النظرية أنظر الزيات (٢٠١٠).

أولاً. المياه السطحية

- مصر والسودان و٩ دول أفريقية أخرى في النيل؛
- العراق وسوريا وتركيا في الفرات ودجلة؛
- سوريا والأردن في نهر اليرموك؛
- لبنان وسوريا في نهر العاصي ونهر الكبيرالجنوبي؛

ثانياً. المياه الجوفية المتجددة وغير المتجددة

- تشاد، مصر، ليبيا، والسودان في شِعب (أو مكمن) النوبة الصخر. رملي Nubian Sandstone Aquifer؛[79]
- الجزائر، ليبيا، وتونس في مجموعة شعاب الصحراء الغربية الشمالية North Western Sahara Aquifer System؛
- الأردن والسعودية في شِعب الديسي Disi Aquifer؛
- السعودية والبحرين في شِعب الدمام Dammam Aquifer.

تحوى معظم هذه الشِعاب (أو المكامن) المشتركة كميات كبيرة من المياه في طبقات جيولوجية عميقة، لكنها مياه غير متجددة وذات نوعيات متباينة (مياه أحفورية).[80]

تثير "المياه العابرة للحدود الوطنية transboundary waters" قضايا صعبة ذات أبعاد متعددة (قانونية، أخلاقية، سياسية، وفلسفية):

- كيف يجب توزيع هذه المياه على الدول المشاركة؟
- ما هي حقوق الأجيال القادمة فيها؟
- هل يمكن التنبؤ بأوضاع المياه وأحوال العالم السياسية في المستقبل البعيد؟ وما هي صحة، دقة، ومصداقية التوقعات المستقبلية؟

توجد بعض الاتفاقات الثنائية والإقليمية التي تنظم استخدام المياه السطحية العابرة للحدود مثل "اتفاقية الانتفاع الكامل بمياه النيل" بين مصر والسودان السابق ذكرها والاتفاق بين

---

[79] يعد خزان النوبة من أضخم الخزانات الجوفية غير المتجددة في العالم حيث تبلغ مساحته ٢.٢ مليون كيلومتر مربع تغطي الجزء الشمال - شرقي لإفريقيا.

[80] أنظر (2012) UNESCO و(2010) LAS, UNEP, & CEDARE.

سوريا والعراق حول مياه الفرات في ١٩٩٠. ولا توجد حتى الآن اتفاقيات مماثلة حول المياه الجوفية. وقد أثبت التاريخ أن من الصعوبة بمكان وضع قانون دولي ملزم ينظم استخدام المياه العابرة للحدود.[٨١]

يسعى الباحثون إلى تحديد بعض المبادئ الأساسية للإدارة الرشيدة لهذه المياه. وفيما يتعلق بحقوق استخدامها بين الدول المشاركة هناك مبدآن متداولان حاليا: الأول هو *الحقوق الطبيعية والتاريخية natural and historic rights*، وهو المبدأ الذي أقرته كما أشرنا سابقاً "الاتفاقية الأنجلومصرية" في ١٩٢٩ و"الاتفاقية المصرية ـ السودانية" في ١٩٥٩. الثاني هو ما يعرف بسم *التوزيع العادل equitable distribution*، وهو المبدأ ذو الاسم الجميل الذي تسعى إلى إقراره دولياً أثيوبيا ومعها بعض دول أعالي النيل. الجدير بالذكر أن مبدأ التوزيع العادل لا يعني التوزيع المتساو بين الدول، كما أنه ليس له تعريف محدد متفق علية عالمياً.

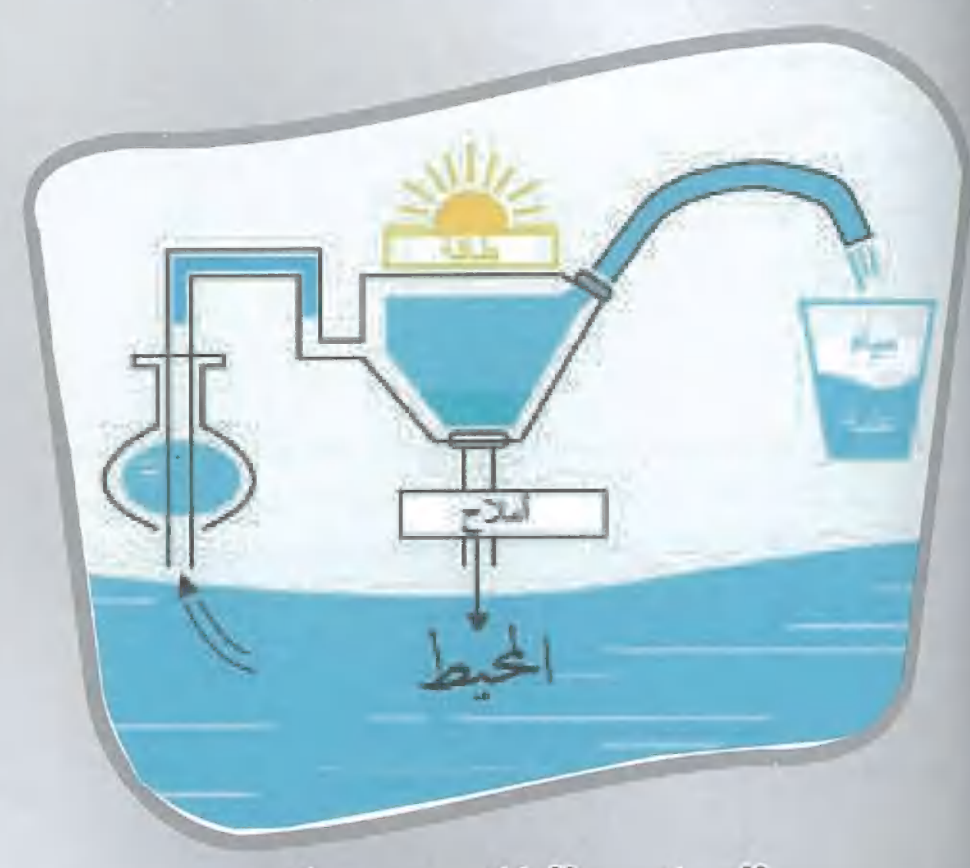
وإدراكاً منها للأهمية الاستراتيجية لقضايا المياه أنشأت بعض الجامعات العربية برامج أكاديمية في علوم وإدارة المياه، مثل "برنامج الدراسات العليا في إدراة الموارد المائية" بجامعة الخليج العربي بالبحرين (الشكل ٥٧).



الشكل ٥٧: جامعة الخليج العربي بالبحرين.

[٨١] أنظر Røsberg (2014).

الجــزء الثالــث



تحليـة المـيـاه

٤. صناعة التحلية

البعض يغترفه ودقًا من السماء
والبعض يعصره من صخرة صماء
فمن قال الشعراء سواء؟
والله يهب ما يشاء لمن يشاء
الشعر ماء
والماء أنواع لمن يفهم
ماء أنهار وماء زمزم
وماء أوحال من يشربه يندم
أو كل الماء ماء زمزم؟
فيه شفاء والله أعلم

العذوبة والملوحة

تحوي جميع أنواع المياه الموجودة طبيعياً مواد ذائبة. تشمل هذه المواد أملاحاً مثل كلوريد الصوديوم، بيكربونات الكالسيوم، كبريتات الماغنسيوم، وتنويعة أخرى من المواد الموجودة في الطبيعة. هذه المواد هي التي تعطي للماء العذب طعمه؛ فالماء الخالي تماماً من الأملاح غير سائغ (وهو الماء المقطر كالذي يستخدم في الأدوية). يبين جدول ٣ تركيز *المواد الصلبة الذائبة* (م ص ذ) *total dissolved solids* بأنواع المياه المختلفة.P17F[٨٢]

يبلغ متوسط تركيز الأملاح في ماء البحر ٣٥٠٠٠ مچ/ل (٣.٥%)، إلا أنه يتباين بدرجة كبيرة من منطقة لأخرى (جدول ٤).[٨٣]

---

[٨٢] أنظر US National Research Council (2004).

[٨٣] يعتقد أن أقصى ملوحة للماء الذي يمكن أن يتجرعة الإنسان ويبقى على قيد الحياة هو ١٥٠٠ جفـم (مچ/ل)؛ لذلك لا يستطيع الإنسان أن يشرب ماء البحر حتى ولو كان على وشك الموت عطشا.

تصنف منظمة الصحة العالمية جودة مياه الشرب حسب تركيز المواد الصلبة الذائبة فيها (جدول ٥)،P2[٨٤] وتوصي بألا يزيد تركيز هذه المواد عن ١٠٠٠ مچ/ل.P19F[٨٥]P

جدول ٣: تركيزات المواد الصلبة الذائبة في أنواع المياه المختلفة.

الوصف	المواد الصلبة الذائبة (مچ/ل)
ماء شرب	أقل من ١٠٠٠
مَسُوس قليلا[٨٦]P	١٠٠٠ ـ ٥٠٠٠
مسوس	٥٠٠٠ ـ ١٥٠٠٠
مسوس كثيرا	١٥٠٠٠ ـ ٣٥٠٠٠
ماء بحر	٣٥٠٠٠ في المتوسط

[٨٤] أنظر WHO (1984).

[٨٥] أنظر WHO (2006).

[٨٦] *الماء المَسُوس* *brackish water* في الفصحى الماء بين العذب والمالح.

جدول ٤: ملوحة مياه بعض البحار.

البحر	الملوحة (مج/ل)
البحر الميت	٢٥٠٠٠٠
الخليج العربي	٤٨٠٠٠
البحر الأحمر	٤٠٠٠٠
البحر المتوسط	٣٨٠٠٠
البحر الأسود	١٨٠٠٠
بحر البلطيق	٨٠٠٠

جدول ٥: صلاحية المياه للشرب حسب محتواها من المواد الصلبة الذائبة.

الصلاحية للشرب	المواد الصلبة الذائبة (مج/ل)
ممتازة	أقل من ٣٠٠
جيدة	٣٠٠-٦٠٠
متوسطة	٦٠٠-٩٠٠
ضعيفة	٩٠٠-١٢٠٠
غير مقبولة	أكثر من ١٢٠٠

التحلية وتاريخها

التحلية هي المصطلح الذي يطلق على عملية إزالة الأملاح *desalination* من المياه المالحة بحيث تصبح صالحة للاستخدامات المختلفة للمياه العذبة، وهي إحدى الوسائل المستخدمة لزيادة موارد المياه العذبة.

تحدث عملية التحلية باستمرار في الطبيعة خلال *دورة الماء water/hydrologic cycle*؛ إذ تتبخر مياه المحيطات (دون الملح) بفعل حرارة الشمس، وتكون الأبخرة المتصاعدة السحب التي تتساقط فيما بعد كمياه "عذبة" على شكل ثلوج وأمطار.

قد يكون من المثير للقارئ العربي أن يعرف أن التحلية الطبيعية تحدث أيضاً في القطبين الشمالي والجنوبي خلال فترة الشتاء! فالجليد الذي يتكون على السطح عندما يتجمد البحر القطب. شمالي أو القطب. جنوبي ما هو إلا ماء عذب.

يبدو أن الإنسان قد عرف التحلية من قديم الزمن؛ إذ تشير بعض المصادر إلى استخدام الصينيين للغاز الطبيعي في تحلية ماء البحر قبل نحو ٢٥٠٠ سنة! كانوا يستخدمون أنابيب من الغاب لتجميع الغاز المتسرب من الأرض، ويشعلون هذا الغاز لغلي الماء المالح بغرض إزالة الأملاح منه.

قبل أكثر من ألفين وثلاثمائة عام أدرك أرسطو أن التحلية تحدث في الطبيعة عند تبخر ماء البحر وسقوط الأمطار، كما كتب أنه يمكن الحصول على الماء العذب عن طريق وضع وعاء من الفخار (وفي بعض المصادر من الشمع) في ماء البحر. وفي سنة ٧٠ ميلادية، عرفت تحلية مياه البحر بالتكثيف على الصوف. كما وصفت تحلية مياه البحر بالتكثيف على الإسفنج بعد ذلك بمائة وثلاثين عاماً (الشكل ٥٨). وفي القرون الوسطى أشار بعض الفلاسفة المسلمين (مثل الحيراني والبيروني) والروم إلى الكتابات القديمة عن التحلية وزادو عليها.P٨٧P21F

لم تنجح عملياً أي من المحاولات القديمة لتحلية مياه البحر بطرق أخرى غير التقطير (مثل الترشيح خلال الفخار أوالرمل). وفي العصر الحديث استخدم المستكشفون والملاحون

[٨٧] أنظر Delyannis & Delyannis (2013: 5 & 6).

الأوربيون التحلية (بالتقطير) أثناء رحلاتهم الاستكشافية في العالم الجديد (التي بدأت في نهاية القرن الخامس عشر). أما استخدام التكنولوجيا الحديثة في التحلية فيعود إلى منتصف القرن الماضي. وقد أنشئت أول محطة تحلية صناعية في ميناء الأحمدي بالكويت في خمسينات هذا القرن.P22F[٨٨]

بدأ الإهتمام بتطوير تكنولوجيا التحلية في الولايات المتحدة الأمريكية خلال الحرب العالمية الثانية. في ١٩٥٢ أصدر الكونجرس الأمريكي قانوناً خاصاً لتوفير الدعم الفيدرالي للتحلية (قانون الماء المالح Saline Water Act)، وقدمت وزارة الداخلية الأمريكية التمويل للتطوير المبدئي لتكنولوجيا التحلية ولإنشاء "محطات توضيحية demonstration plants" (طوال فترة الخمسينات والستينات من خلال ما كان يعرف بسم "مكتب الماء المالح Saline Water Office").

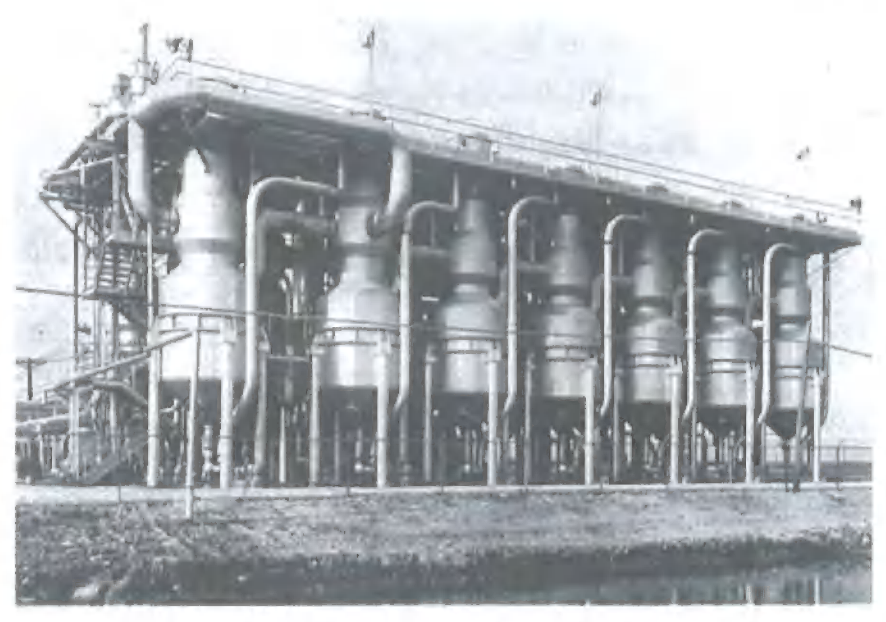


الشكل ٥٨: تكثيف البخار على الأسفنج.

---

[٨٨] أنظر Elimelech & Phillip (2011) و Hamoda (2001).

أعلن الرئيس الأمريكي ("جون كينيدي John Kennedy") في ١٩٦١ افتتاح واحدة من كبريات محطات التحلية في ذاك الوقت: محطة التحلية بمدينة "فريبورت Freeport" بتكساس (الشكل ٥٩). تكلف إنشاء تلك المحطة ١.٥ مليون دولار، وبلغت طاقتها الإنتاجية مليون جالون في اليوم.



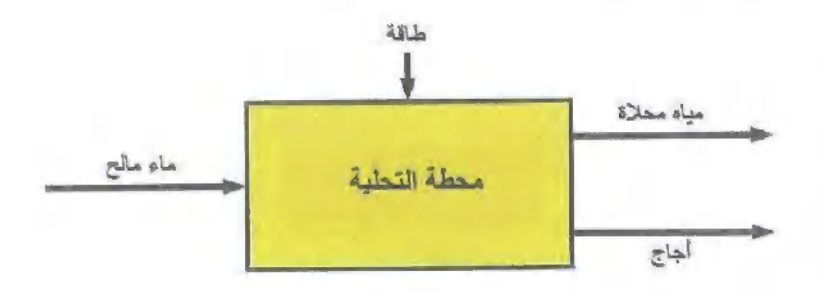
الشكل ٥٩: محطة فريبورت للتحلية (تكساس، الولايات المتحدة).

إنتاج المياه المحلاة

صناعة التحلية هي عملية مكلفة ومستهلكة للطاقة. تستخدم تقنيات التحلية في السفن والغواصات التي تجوب البحار لفترات طويلة من الزمن، ولكن الاستخدام الرئيسي لها هو من أجل توفير المياه العذبة في المناطق التي تعاني من شح الموارد المائية الطبيعية.
وفقاً لتقديرات "الجمعية الدولية للتحلية International Desalination Association" وصل إنتاج محطات التحلية الموجودة في العالم (حتى ٣٠ يونيو ٢٠١٥) إلى ما يزيد عن ٨٦.٨ مليون متر مكعب يومياً.P[٨٩]P23F

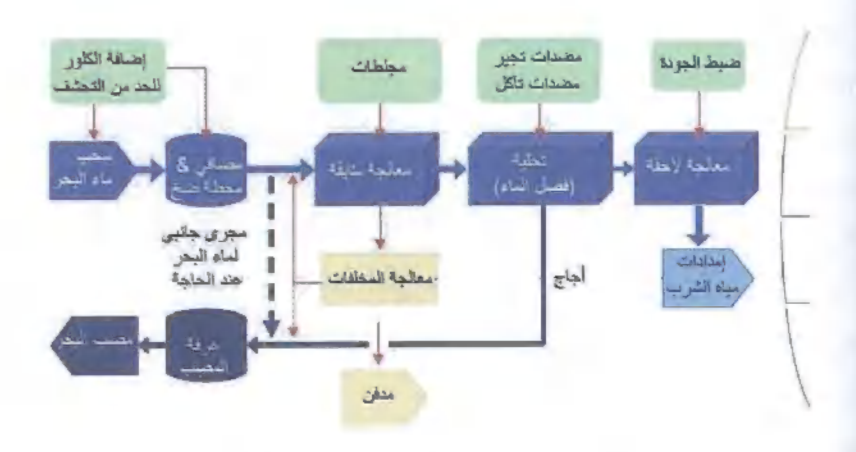
[٨٩] أنظر IDA (2016).

توظف محطات التحلية صوراً مختلفة من الطاقة (حرارة، كهرباء، أو ضغط) في عملية التحلية. ينتج عن عملية التحلية - أياً كانت التقنية المستخدمة فيها - نوعان من المياه: مياه محلاة (منزوع منها الأملاح desalinated)، ومياه عالية الملوحة تعرف اختصاراً بـ *المالح أو الأجاج* *brine* (ملوحتها أعلى من ملوحة ماء البحر) (الشكل ٦٠).



الشكل ٦٠: المدخلات والمخرجات الرئيسية في عملية التحلية. المصدر: Clayton (2007)

يمكننا تقسيم عملية إنتاج المياه المحلاة إلى ثلاث مراحل رئيسية: معالجة الماء الخام (الماء المالح)، التحلية، معالجة الماء المنتج (المُحلى) (الشكل ٦١).



الشكل ٦١: مراحل عملية التحلية.

معالجة الماء الخام

تحتوي المياه المالحة الطبيعية ـ بالإضافة إلى المواد الصلبة الذائبة ـ على العديد من الأشياء الحية (أسماك، طحالب، بكتيريا، وغيرها) وغير الحية (طمي، أكسجين ذائب، إفرازات الأحياء المائية، إلخ). تقلل هذه المكونات من كفاءة أجهزة التحلية وعمرها التشغيلي؛ لذلك يتم معالجة مياه التغذية قبل إدخالها على أجهزة التحلية. تتضمن هذه المعالجة إضافة بعض الكيماويات وبعض أشكال الترشيح.

مشكلة التحشف الحيوي

تحتوي المياه على العديد من الكائنات البحرية الصغيرة (مثل البكتيريا، الطحالب، والرخويات). تتجمع هذه الكائنات على الأسطح المغمورة بمياه البحر وتنمو عليها وتتكاثر. بمرور الوقت تتغطى تلك الأسطح بطبقة سميكة من الكائنات البحرية والمواد العضوية (الشكل ٦٢). يطلق على هذه المشكلة اسم *التَّحشُّف* أو *التَّأشُّن الحيوي biofouling*، وهو يحدث أيضاً لأجهزة التحلية.

في أوائل التسعينات جرى التعرف على فئة مميزة من الجسيمات العضوية الشفافة التي توجد بوفرة في المحيطات.P٩٠P24F تتكون هذه الجسيمات من *البوليمرات polymers* الذائبة التي تفرزها *العوالق النباتية phytoplankton* والبكتيريا الموجودة في المياه. تعرف هذه الشوائب الآن بسم *جسيمات البوليمرات الخارجية الشفافة Transparent Exopolymer Particles* (TEP) (الشكل ٦٣). توجد جسيمات البوليمرات الشفافة في المياه ـ العذبة والمالحة ـ بتركيزات تتراوح من ٢٨ إلى ٥٠٠٠ جسيمة في المليلتر الواحد. تتخذ هذه الجسيمات أشكالاً مختلفة، وتتراوح أحجامها فيما بين ٢ - ٢٠٠ ميكرومتر (الميكرومتر يعادل ٠.٠٠٠٠٠١ من المتر أي١٠$^{-٦}$). جسيمات البوليمرات الشفافة هلامية لزجة مما يسهل التصاقها بأجهزة التحلية، وكذلك التصاق الكائنات الدقيقة بها. تشكل هذه المواد مصدراً

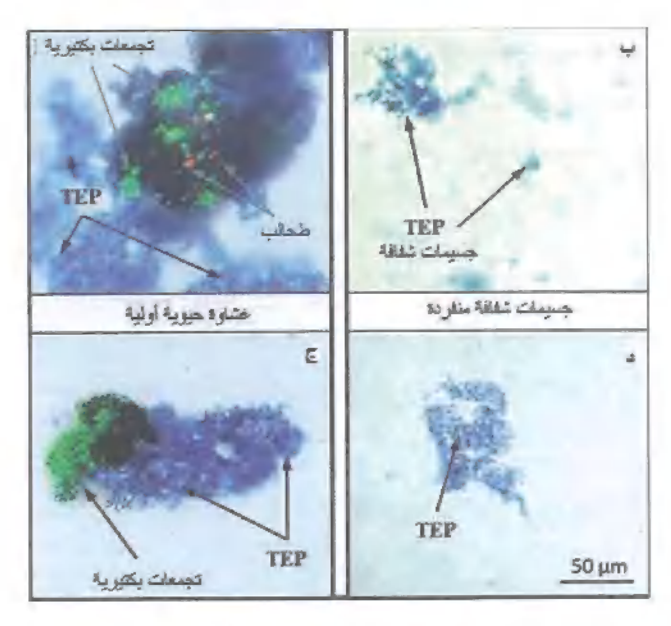
---

[٩٠] أنظر Alldredge et al. (1993).

غذائياً هاماً للكائنات الدقيقة بما فيها البكتيريا. يساهم وجود الجسيمات الشفافة، وغيرها من الشوائب، في التحشف الحيوي لأسطح أجهزة التحلية.



الشكل ٦٢: التحشف الحيوي على قلنسوة داخل حوض أسماك.



الشكل ٦٣: جسيمات البوليمرات الشفافة (منفردة أو ملتصق بها تجمعات بكتيرية وطحالب).

٥. تقنيات تحلية المياه

تعمل معظم محطات التحلية الكبيرة بإحدى التقنيتين التاليتين:

- *التقطير الحراري thermal distillation*؛
- *والتحلية باستخدام الأغشية membrane desalination*.

التقطير الحراري

تتبخر السوائل عندما ترتفع درجة حرارتها، ويبلغ معدل التبخر أقصاه عند درجة الغليان. تبدأ السوائل بالغليان عندما يتعادل ضغط جزيئات السائل مع ضغط الهواء المحيط، ويزداد ضغط هذه الجزيئات بارتفاع درجة حرارة السائل.

يغلي الماء تحت الضغط الجوي المعتاد عند ١٠٠°س، وإذا ما خفضنا (بالتفريغ) ضغط الهواء المحيط بالماء المسخن فإنه يغلي عند درجات حرارة أقل من ذلك. تعتمد الطرق الحرارية لتحلية المياه - كما يوحي اسمها - على تسخين المياه المالحة، ثم تكثيف الأبخرة الناتجة.P٩١P25F

تسعى طرق التقطير الحراري المختلفة إلى زيادة كفاءة استخدام الطاقة من خلال الاستفادة من حرارة التبخر الكامنة إلى أقصى حد ممكن (راجع الجزء الخاص بخصائص الماء الحرارية).[٩٢] وبسبب تكلفتها العالية، نادراً ما تستخدم تقنية التقطير الحراري في تحلية *الماء المَسُوس brackish water*.

---

[٩١] بسبب التفريغ تنخفض كمية الحرارة اللازمة لعملية تبخير المياه مما يؤدي إلى التوفير في الطاقة التي تستهلكها محطات التحلية.

[٩٢] يحتوي بخار الماء على كمية كبيرة من الحرارة؛ وتسعى كل تقنيات التحلية الحرارية إلى الاستفادة من هذه الطاقة في تسخين المزيد من مياه التغذية المالحة قبل تبخيرها.

تضم تقنية التقطير الحراري عدة *طرق* او *عمليات* للتحلية، من أهمها الطرق الثلاثة التالية:

- *التقطير اللحظي متعدد المراحل* (ت ل م) *multi-stage flash distillation*؛P26F[93]
- *التقطير متعدد التأثير* (ت م ت) *multi-effect distillation*؛
- *والتقطير بضغط البخار* (ت ض ب) *vapor-compression distillation*.

التقطير اللحظي متعدد المراحل

تقام محطات التقطير اللحظي منذ أواخر خمسينات القرن الماضي. تتميز هذه المحطات بأنها تنتج مياه ذات تركيزات ملحية منخفضة جداً (أقل من ١٠ مج/ل) من مياه شديدة الملوحة (حتى ٧٠ مج/ل).P27F[94]

تعتمد هذه العملية على استخدام التقطير خلال عدة غرف أو مراحل (الشكل ٦٤). يحدث التقطير في كل مرحلة من هذه المراحل تحت ضغط أقل من الضغط الواقع على المياه الساخنة في المرحلة السابقة. تسخن *مياه التغذية feed water* (ماء البحر الخام) أولاً تحت ضغط عال، ثم تمرر إلى غرفة التبخر **'flash' chamber** الأولى، حيث ينخفض الضغط عليها، مما يسبب غليانها وتبخرها في التو واللحظة. يستمر هذا التبخر "اللحظي **flashing**" لبعض من مياه التغذية خلال جميع المراحل، وذلك بسبب انخفاض الضغط في كل مرحلة عنه في سابقتها. تُكثّف الأبخرة المتولدة على مبادلات حرارية تمتد عبر جميع المراحل، وتبرد هذه المبادلات الحرارية بواسطة مياه التغذية (مياه البحر) التي تمر بداخلها.P[95]P28F تُجمع قطرات المياه المتكاثفة والناتجة عن عمليات التقطير اللحظي، والتي تسمى اختصاراً بـ *القطارة distillate*، لتشكل ناتج الوحدة من المياه المحلاة.

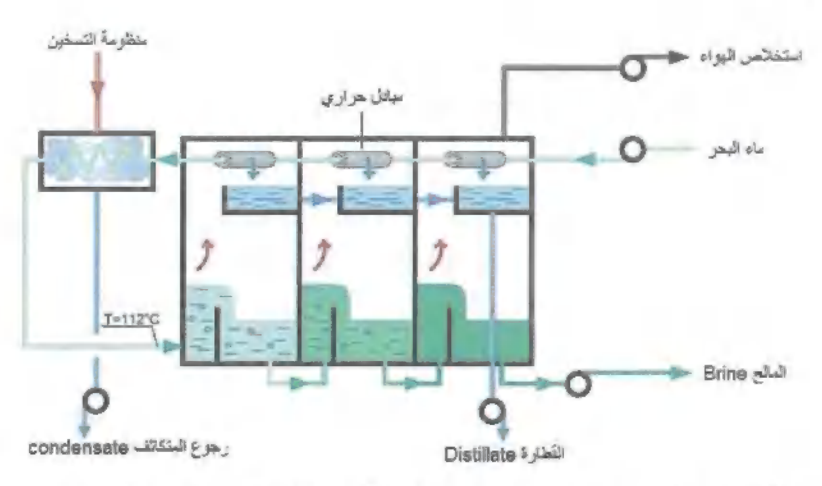
---

[93] الترجمة العربية الشائعة لهذه الطريقة هي "التقطير الوميضي"، ولكننا فضلنا استخدام كلمة "اللحظي".

[94] أنظر Heather et al. (2006).

[95] يطلق المهندسون اسم *المبادل الحراري* على أي جهاز يستخدم في مبادلة الحرارة بين سائلين (أي انتقالها من السائل الأحر إلى السائل الأبرد). للمبادلات الحرارية وظيفة مزدوجة: تبريد الأبخرة المتصاعدة، ومن ثم تكاثفها إلى مياه عذبة، وفي ذات الوقت استخدام حرارة هذه الأبخرة في تسخين ماء البحر مبدئيا قبل مروره على منظومة التسخين الأساسية، وبالتالي التوفير في الطاقة المستخدمة خلال عملية التحلية.

بشكل عام تتحول نسبة قليلة فقط من مياه التغذية إلى مياه عذبة أثناء هذه العملية، وترتفع هذه النسبة مع زيادة عدد مراحل التقطير. عادة ما تحتوي وحدات التقطير اللحظي ما بين ٤ - ٤٠ مرحلة.



الشكل ٦٤: رسم تخطيطي لعملية التقطير اللحظي متعدد المراحل.

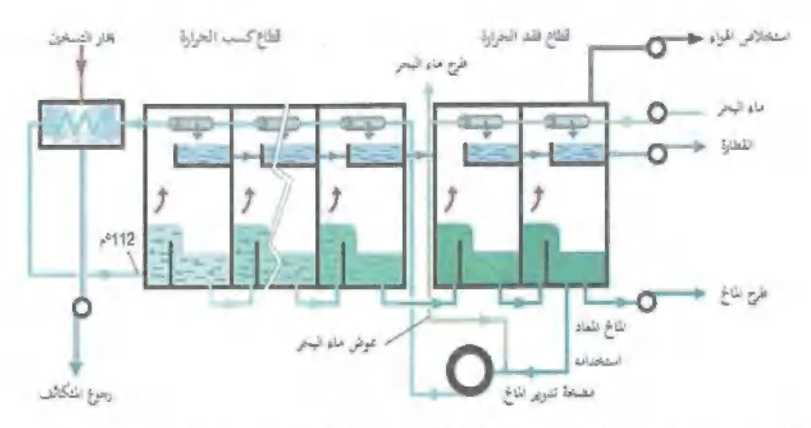
يعاد في بعض وحدات التقطير اللحظي استخدام جزء من المالح (أو الأجاج) المتبقي في المرحلة الأخيرة بإضافتة مع مياه التغذية من جديد (الشكل ٦٥).[٩٦]

تتعرض أجهزة التقطير اللحظي للتآكل corrosion لو لم يكن الصلب المقاوم للصدأ مستخدماً بكثافة في بنيتها، كما تتعرض لمشاكل التعرية والنحر erosion نتيجة لاضطراب المياه أثناء انتقالها عبر غرف التبخر.

تعتبر هذه الطريقة هي الأكثر فعالية، وربما الأوسع استخداماً من بين طرق التقطيرالأساسية الثلاثة. توجد معظم محطات التقطير اللحظي حالياً في منطقة الخليج، حيث تتوافر مصادر الطاقة بتكلفة منخفضة.

---

[٩٦] مثال: محطة الخبر للمياه والكهرباء بالسعودية.



الشكل ٦٥: رسم تخطيطي لعملية التقطير اللحظي مع تدوير بعض الأجاج.

التقطير متعدد التأثير٢٩F[٩٧]

يتم التقطير في هذه الطريقة عبر سلسلة من الأوعية أو الخلايا المتتابعة (الشكل ٦٦)، وينخفض الضغط والحرارة في كل خلية عن الخلية السابقة. ينتقل بخار الماء (وليس ماء البحر) عبر المبادلات الحرارية من خلية لأخرى، أما ماء البحر فيرش على المبادلات الحرارية من أعلى كل خلية.

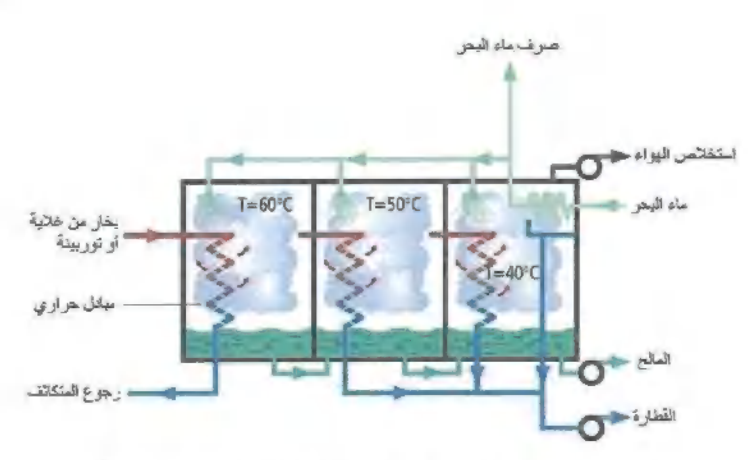
يضخ البخار المتولد من غلاية boiler (أو الآتي من توربينة turbine) عبر المبادل الحراري الموجود في الخلية الأولى. يعمل هذا المبادل الحراري على تبخير بعض من ماء البحر المتساقط عليه من أعلى الخلية، وفي المقابل يتكاثف البخار المار بداخله. ينتقل البخار المتولد في الخلية الأولي إلى المبادل الحراري في الخلية الثانية لتتكرر عملية التقطير، وهكذا حتى الخلية الآخيرة. يكثف البخار المتولد في الخلية الأخيرة بواسطة مبادل حراري آخر يبرد بواسطة ماء البحر الداخل إلى وحدة التقطير. نلاحظ أن المياه المحلاة تتكون في هذه الطريقة من تكاثف البخار داخل أنبوب المبادل الحراري.

---

[٩٧] اخترع "نوربير ريليه Norbert Rilieux" *المبخر متعدد التأثير multi-effect evaporator* في ١٨٥٤. طورت هذه العملية أصلا لتركيز السكر في عصارة القصب، لكنها تستخدم الآن أكثر في إنتاج الملح وتحلية المياه.

يحدث التبخر في وحدة التقطير المتعدد مباشرة على الأسطح الخارجية للمبادلات الحرارية، وهو ما يعرض هذه الوحدات بدرجة كبيرة لمشاكل *التجير scaling* (حيث تترسب طبقات من كربونات الكالسيوم على الأسطح الداخلية لوحدات التقطين).

تستخدم طريقة التقطير متعدد التأثير منذ أواخر الخمسينات وأوائل الستينات. توجد محطات التقطير متعدد التأثير في كل من منطقتي الكاريبي والشرق الأوسط (مثال: محطة الفجيرة بالإمارات).[٩٨]



الشكل ٦٦: رسم تخطيطي لعملية التقطير متعدد التأثير.

التقطير بضغط البخار

تستخدم طريقة التقطير بضغط البخار إما مدمجة مع طرق أخرى أو بمفردها، ويوضح الشكل ٦٧ فكرة عمل هذه الطريقة.

يتم توليد البخار من الماء المالح عن طريق مصدر حراري. يضغط البخار المتولد بواسطة مكبس، فترتفع نتيجة لذلك حرارته (تلاحظ نفس التأثير عندما تنفخ إطارات الدراجة ويسخن

---

[٩٨] سعة محطة الفجيرة ٣٦٤٠٠٠ متر مكعب يوميا. تشتمل المحطة على ١٢ وحدة تحلية بالتقطير متعدد التأثير على ثمانية مراحل.

المنفاخ). يمرر البخار الساخن المضغوط في أنابيب مبادل حراري مغمورة في ماء التغذية (المالح)، فيبرد ويتكثف كماء مقطر (عذب). تزداد في الوقت ذاته حرارة الماء المالح، ويتولد مزيد من البخار.

عادة ما يستخدم التقطير بضغط البخار عندما يكون الطلب على المياه المحلاة صغيرا، مثلما هو الحال في التجمعات الصغيرة والمنتجعات وعلى السفن.

كانت هذه الطريقة شائعة الاستخدام في أستراليا (احتلت في ٢٠٠٢ المرتبة الثانية بعد التناضح العكسي، وكانت مسئولة عن إنتاج نحو ١٨% من السعة الوطنية هناك).P30F.[٩٩]

التحلية باستخدام الأغشية

يمكن أن تتم عمليات التحلية من خلال الأغشية، وتقنيات الأغشية هي الأكثر شيوعاً في كل من الولايات المتحدة وإسبانيا وأستراليا. وحديثا يجرى استخدامها بتزايد في منطقة الشرق الأوسط.

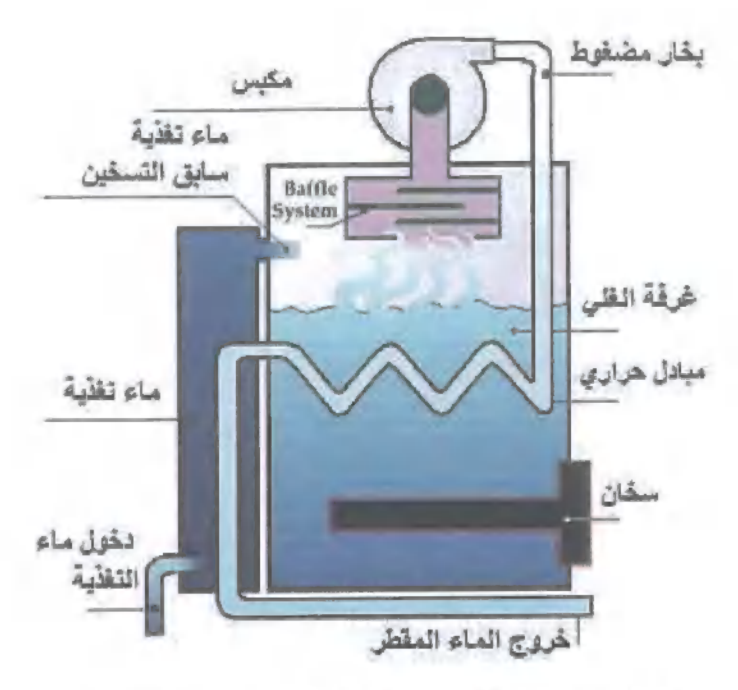
من أهم طرق التحلية باستخدام الأغشية طريقة *التناضح العكسي* (ت ع) *reverse osmosis* وطريقة *الفصل الكهربائي* (ف ك) *electrodialysis*.

طريقة التناضح العكسي

صممت طريقة التناضح العكسي أساساً لتحلية الماء المسوس، وقد تم تطويرها بعد ذلك لتحلية ماء البحر. تحتاج هذه الطريقة لطاقة أقل مما تحتاجه طريقة التقطير اللحظي متعدد المراحل، ومن ثم فهي أقل في تكاليف التشغيل. كما تنخفض هذه التكاليف كثيراً مع انخفاض ملوحة الماء المراد تحليته.

---

[٩٩] أنظر URS Australia (2002). تستخدم كلمة "قدرة" في بعض الكتابات العربية مقابل كلمة "capacity" الإنجليزية. لكننا فضلنا استخدام كلمة "سعة" لأن مصطلح *قدرة* (مقابل *power* الإنجليزية) يعني معدل إنتاج (أو استخدام) الطاقة، واللغة العلمية لا تقبل استخدام لفظ واحد للدلالة على مفهومين مختلفين.

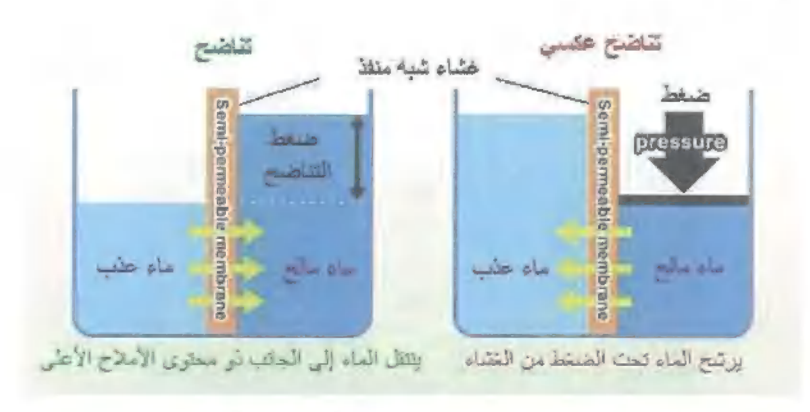


الشكل ٦٧: رسم تخطيطي لعملية التقطير بضغط البخار.

يتم في هذه الطريقة ضخ المياه المالحة بقوة خلال أغشية شبه منفذة. *الغشاء شبه المنفذ semi-permeable membrane* هو شريط رفيع أو غلالة رقيقة من مادة تسمح بمرور جزيئات الماء من خلالها وتحجز الجزيئات والجسيمات الأكبر (مثل جزيئات الأملاح والمعادن وخلايا الكائنات الدقيقة) وتمنعها من المرور. تصنع هذه الأغشية شبه المنفذة من تنويعة عريضة من المواد مثل السليلوز، النايلون، والخزف.

يرجع الأساس العلمي لاستخدام الأغشية في عمليات فصل الأملاح لظاهرة *التناضح osmosis*، وهي ظاهرة طبيعية ينتقل فيها الماء عبر الأغشية شبه المنفذة من المحلول الأقل تركيزاً (الذي به نسبة أقل من الأملاح الذائبة) إلى المحلول الأعلى تركيزاً (الأكثر ملوحة). تجدر الإشارة هنا إلى أن النباتات تحصل على المياه والمغذيات من التربة من خلال عملية التناضح، حيث تعمل الجذور عمل الأغشية شبه المنفذة.

إذا وضعنا غشاء شبه منفذ بين محلولين ليفصل بينهما وكان أحدهما تركيزه أكبر من الثاني فإن جزيئات *المذيب* *solvent* (الماء مثلا) الأقل حجماً من جزيئات الأملاح تنتقل بين المحلولين، لكن المحصلة تكون في انتقال جزيئات المذيب إلى المحلول الأكثر تركيزا. يطلق على الضغط الطبيعي الذي يدفع بالماء عبر الغشاء شبه المنفذ في إتجاه المحلول ذي التركيز الأعلى اسم *ضغط التناضح* (أو *الضغط الإسموزي*) *osmotic pressure*. يستمر هذا الانتقال حتى يتساوى التركيز في الناحيتين أو يصبح الفرق بين ضغط الماء في القسمين معادلاً لضغط التناضح (الشكل ٦٨). يتزايد مقدار ضغط التناضح بزيادة الفرق بين التركيزين على جانبي الغشاء.



الشكل ٦٨: التناضح الطبيعي والتناضح العكسي.

لكي تمر جزيئات المياه عبر الغشاء شبه المنفذ في عكس اتجاه ضغط التناضح (حتى يتم فصل الأملاح عن المياه) يلزم ممارسة ضغط خارجي على المياه المالحة (ماء البحر مثلا) أعلى في مقداره من ضغط التناضح الطبيعي، وتعرف هذه الطريقة بسم *التحلية بالتناضح العكسي*.

تتكون منظومة التحلية بالتناضح العكسي عادة من مصفوفة من أوعية ضغط إسطوانية تحوي بداخلها الأغشية شبه المنفذة (الشكل ٦٩).

تصنع الأغشية المستخدمة للتناضح من مواد مختلفة وعلى *أشكال* *configurations* متنوعة.كانت *أسيتات السليليوز* *cellulose acetate* من أولى المواد التي استخدمت على

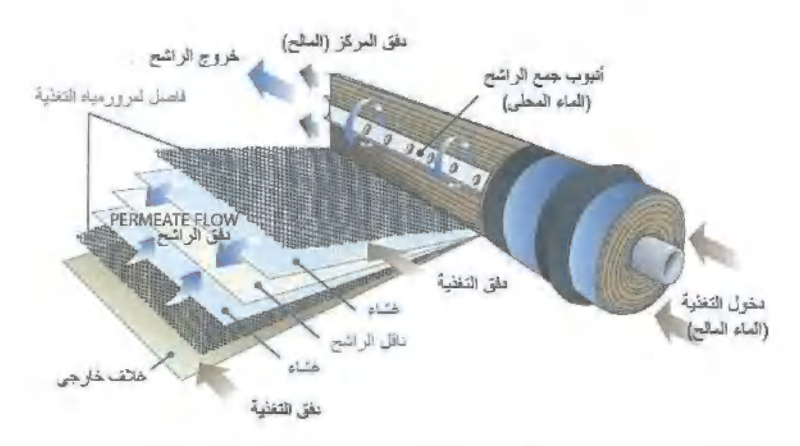
نطاق تجاري، أما في الوقت الراهن فعادة ما يستخدم خليط من *ثاني وثالث أسيتات السليولوز* *cellulose di-* and *tri-acetate*. وقد أخذت البوليمرات المخلقة مثل *الأميدات المتعددة* *polyamides* تحل محل أغشية السليولوز الطبيعي؛ يرجع ذلك أساساً إلى متانة تلك المواد ورفضها العالي لمرور الأملاح. علاوة على ذلك تتحمل الأميدات المتعددة مدى أعلى من درجات الحموضة pH، كما تقاوم هجمات الكائنات والملوثات البحرية. وقد أجريت حديثاً بعض الاختبارات على الأغشية المصنوعة من الخزف ceramics ولكن لم يتم استخدامها حتى الآن على نطاق تجاري.



الشكل ٦٩: صورة لمحطة تحلية تعمل بطريقة التناضح العكسي.

من أهم أشكال الأغشية الشائعة تلك *الملفوفة حلزونياً* *spiral wound* (الشكل ٧٠). تصنع تلك الأغشية كالتالي: (١) يلصق فرخ من مادة تمتص المياه (*فاصل/ناقل الراشح* *permeate spacer/carrier*) حول انبوب مثقب لجمع المياه المحلاة (*أنبوب جمع الراشح* *permeate collection tube*)؛ (٢) يوضع غشاء فوق ناقل الراشح وآخر تحته، وتلصق حواف الغشائين بحواف ناقل الراشح؛ (٣) يوضع فوق "مظروف" الأغشية المتكون (الحاوي

لناقل الراشح) وتحته طبقة من نسيج شبكي (*فاصل التغذية feed spacer*)؛ (٤) تلف مجموعة الطبقات هذه حول أنبوب الراشح، وتثبت حوله بغلاف خارجي غير منفذ للماء.



الشكل ٧٠: تركيب أحد عناصر الأغشية الملفوفة حلزونيا.

يطلق على هذا التكوين اسم *عنصر الأغشية membrane element*، وهو يوضع بداخل أحدى أوعية الضغط (الشكل ٧١).P١٠٠31F



الشكل ٧١: قطاع عرضي في وعاء ضغط بداخله عنصر أغشية ملفوفة حلزونيا.

[١٠٠] في محطات التحلية، يوضع ما بين ستة وسبعة عناصر على التوالي في كل وعاء.

يضخ الماء المالح في أوعية الضغط الإسطوانية فيمر من خلال فواصل التغذية فيما بين طبقات الأغشية الملفوفة. يرشح جزء من المياه (دون الأملاح) تحت الضغط من خلال الأغشية شبه المنفذة ويصل في النهاية عبر ناقل الراشح (المبطن للأغشية) إلى أنبوب جمع الراشح (الشكل ٧٣).

يصرف محلول الأجاج (المحلول الملحي المركز) على البحر، ويشكل ما بين ١٠ - ٥٠% من مياه التغذية حسب ملوحة مياه التغذية والضغط المستخدم.

يشكل التحشف الحيوي مشكلة خطيرة في التحلية بالتناضح العكسي؛ تتكون طبقة من البكتيريا على الأغشية، تعرف بسم *الغشاوة/الرقاقة الحياتية biofilm* (الشكل ٧٣)، تقلل من معدل *إفاضة* (أو *سريان*) *flux* المياه، فعالية الأغشية، وعمرها الإنتاجي، ومن ثم تزداد تكلفة التحلية.

تضم محطات التناضح العكسي أربعة منظومات رئيسية: (١) *المعالجة السابقة* (أو *الأولية*) *pretreatment*؛ (٢) الضغط العالي؛ (٣) الفصل بالأغشية؛ و(٤) *المعالجة اللاحقة* (أو *النهائية*) *post-treatment*. تعتبر معالجة ماء التغذية خطوة هامة جداً في عملية التحلية بالتناضح العكسي من أجل الحفاظ على نظافة الأغشية وحمايتها من التلف بفعل التحشف والأكسدة.

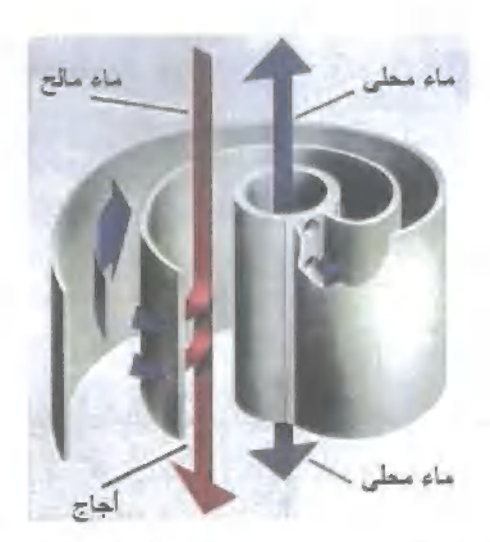
تعتبر طريقة التناضح العكسي حديثة نسبيا، حيث بدأ تطبيقها بشكل تجاري في السبعينات من القرن الماضي.P١٠١P32F أنشئت أول محطة تجارية للتحلية بالتناضح العكسي في السعودية في عام ١٩٧٥،P١٠٢P33F وتعتبر "محطة المقطع" في الجزائر واحدة من كبرى المحطات الحديثة التي تعمل بالتناضح العكسي (بسعة تبلغ ٥٠٠ ألف متر مكعب يوميا).

يعد التناضح العكسي في الوقت الحالي الطريقة الأوسع استخداماً في كل من الولايات المتحدة الأمريكية، أستراليا، وجنوب أوروبا.

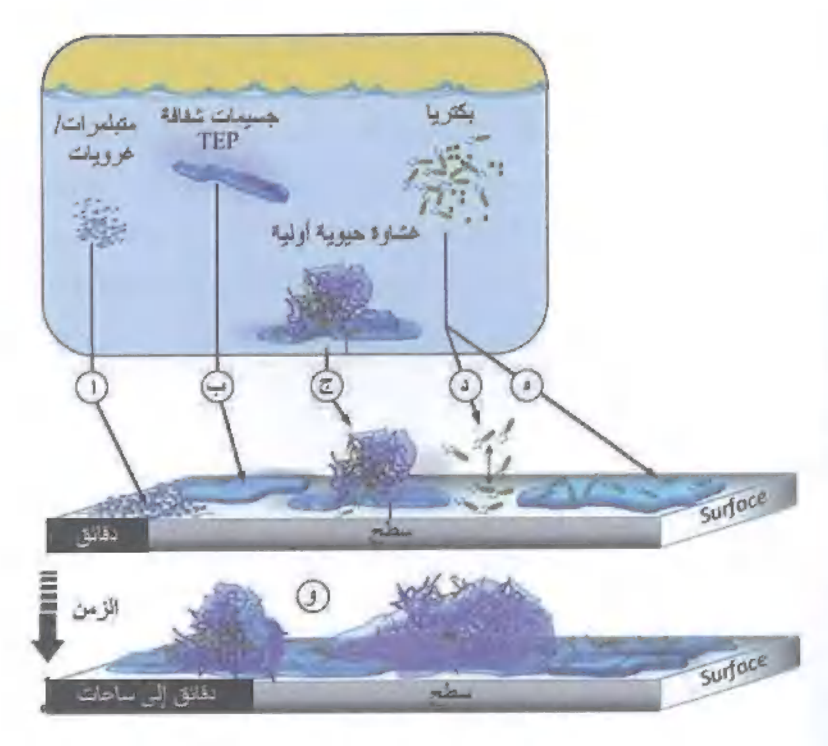
---

[١٠١] أنظر Buros (2000).

[١٠٢] أنظر AWWA (2011: 29).



الشكل ٧٢: مسارات الماء المالح والمحلى والأجاج خلال عنصر الأغشية.



الشكل ٧٣: دور الجسيمات الشفافة في تكون الغشاوة الحياتية على أغشية التناضح العكسي.

الفصل الكهربائي

تتواجد معظم الأملاح الذائبة في الماء على شكل *أيونات ions* موجبة (*كاتيونات cations*) وسالبة (*أنيونات anions*). يذوب ملح الطعام، على سبيل المثال، في الماء منتجاً أيونات الصوديوم ($NaP^{+}P$) والكلور ($ClP^{-}P$):

$$NaCl \rightarrow NaP^{+}P + ClP^{-}$$

يوضح الشكل ٧٤ فكرة عمل التحلية بـ*الفصل الكهربائي* (ف ك) *electrodialysis*. تحت تأثير التيار الكهربائي الثابت تتجه الأيونات الموجبة (الصوديوم) إلى القطب السالب، بينما تتجه الأيونات السالبة (الكلور) إلى القطب الموجب. يسمح الغشاء الممرر للأنيونات بمرور أيونات الصوديوم الموجبة بينما يسمح الغشاء الممر للكاتيونات بمرور أيونات الكلور السالبة. يتكون لدينا بهذه الطريقة أعمدة متتابعة من المياه عالية الملوحة (أجاج) والمياه المحلاة. تشتمل محطات الفصل الكهربائي الصناعية على صفوف من مئات الأغشية.

يعد الفصل الكهربائي أول عملية تحلية بالأغشية تلقى نجاحاً تجارياً؛ حيث بدأ إنتاج محطات الفصل الكهربائي خلال حقبة الستينات، أي قبل التناضح العكسي بنحو ١٠ سنوات. من بين محطات الفصل الكهربائي الأولى في العالم المحطتان الليبيتان اللتان أنشئتا في عام ١٩٥٩ بكل من طبرق (بسعة ٥٥ م^{٣}/يوم) وزليتن (بسعة ٤٥٠ م^{٣}/يوم) (الشكل ٧٥).

تتعرض *أغشية التبادل الأيوني ion exchange membranes* المستخدمة في الفصل الكهربي للتلف بفعل التحشف الحيوي، وهو ما يمكن التغلب عليه جزئياً عن طريق عكس إتجاه التيار الكهربائي. تعرف هذه الطريقة بسم *الفصل الكهربائي المعكوس electrodialysis reversal*، وقد بدأ تطبيقها في أوائل سبعينات القرن الماضي.P34F[١٠٣]

يجرى تصميم قنوات (غرف) الأجاج في وحدات الفصل المعكوس بحيث تكون مماثلة لقنوات الماء المُحلى. يُعكس اتجاه التيار الكهربي على عدة فترات خلال الساعة الواحدة، مما يسبب انجذاب الأيونات في الاتجاه المعاكس خلال الأغشية. يستبعد الماء المنتج فورعملية

---

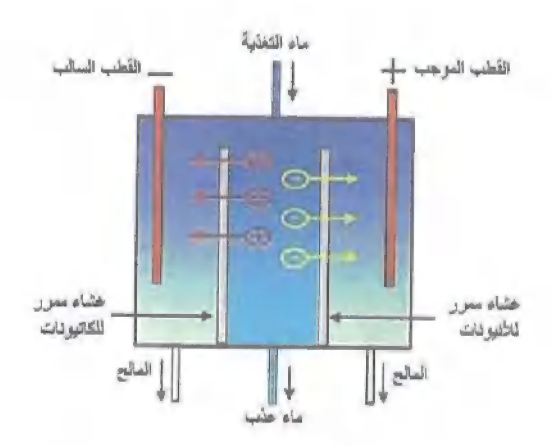
[١٠٣] أنظر (2000) Buros.

عكس اتجاه التيار حتى يستعيد نقاوته من جديد. يعمل هذا العكس على "غسل flushing" خطوط الإنتاج وإزالة الرواسب والغرين قبل تراكمها على أجهزة الفصل، كما يقلل ذلك من التحشف الحيوي على الأغشية.

رغم ظهور الفصل الكهربائي في الأصل كطريقة لتحلية ماء البحر إلا أنه استخدم عادة في تحلية الماء المسوس. على سبيل المثال، تستخدم وحدات الفصل القليلة الموجودة حالياً بولاية تكساس Texas الأمريكية في تحلية المياه منخفضة الملوحة (مثل "بحيرة جرانبيري وشيرمان Lake Granbury and Sherman").P35F[١٠٤]

مازال الفصل الكهربائي مستخدماً إلى اليوم، لكن التناضح العكسي استحوذ على المكانة الأفضل في التحلية باستخدام الأغشية. عادة لا يتم تفضيل الفصل الكهربي المعكوس على التناضح العكسي إلا في حالة الأنظمة التي لديها مشاكل تتعلق بكيمياء المياه المستخدمة، مثل ارتفاع نسبة الكبريتات إلى الكلوريدات.P36F[١٠٥]

حديثاً أقيمت في برشلونة بإسبانيا محطة كبيرة جداً لتحلية الماء المسوس بالفصل الكهربي المعكوس، حيث تبلغ سعتها ٢٠٠٠٠٠ م^{٣}/يوم.

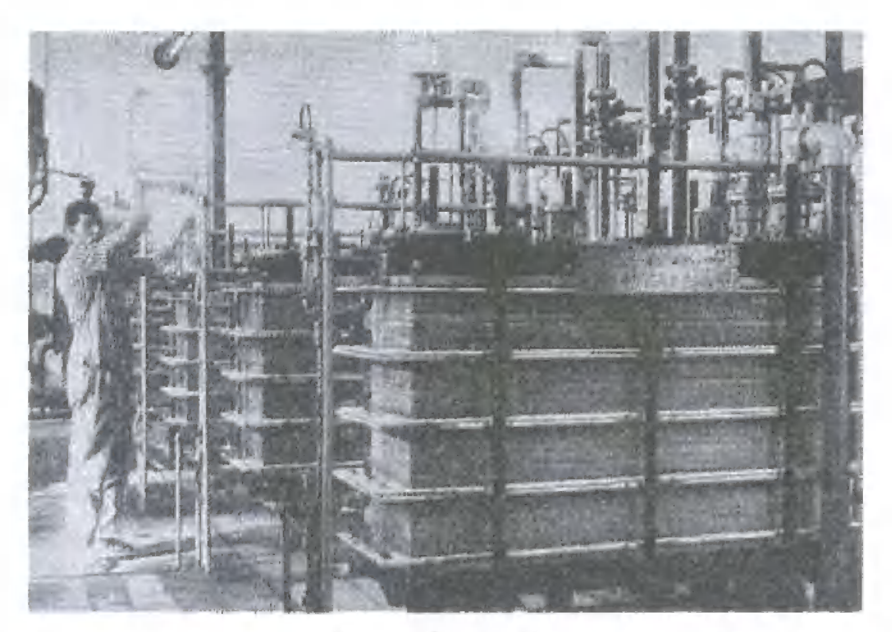


الشكل ٧٤: رسم تخطيطي لعملية الفصل الكهربائي.

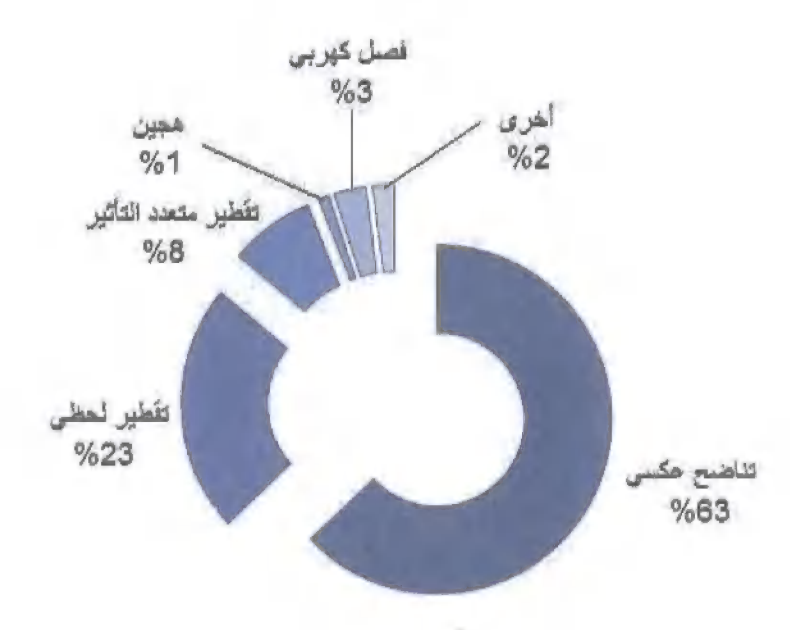
---

[١٠٤] أنظر Krishna (2004).

[١٠٥] أنظر Ghaffour et al. (2013).



الشكل ٧٥: محطة الفصل الكهربائي التي أنشئت في ١٩٥٩ في زليتن، ليبيا. المصدر: Clayton (2015: 29)



الشكل ٧٦: السعات حسب تقنية التحلية المستخدمة. المصدر: (2014) ıcera

مقارنة بين طرق التحلية الرئيسية

طرق التحلية الأكثر استخداماً على مستوى العالم هي على التتابع كالتالي: التناضح العكسي، التقطير اللحظي متعدد المراحل، والتقطير متعدد التأثير (الشكل ٧٦). ويبين جدول ٦ مزايا وعيوب كل من هذه الطرق الرئيسية.

جدول ٦: مقارنة بين طرق التحلية الثلاثة الرئيسية.

	ت ع (تقنية أغشية)	ت ل م & ت م ت (تقنيتان حراريتان)
نقاط القوة	• متطلبات طاقة أقل • استخلاص مياه أعلى	• أبسط نسبياً في التشغيل • القدرة على إنتاج مياه أنقى
أوجه الضعف	• الأغشية عرضة للتحشف • تتطلب معالجة سابقة كاملة	• متطلبات طاقة أعلى • استخلاص مياه أقل

ت ع: تناضح عكسي؛ ت ل م: تقطير لحظي متعدد؛ ت م ت: تقطير متعدد التأثير

تعتبر طريقة التناضح العكسي هي المفضلة عالمياً منذ نحو عقد من الزمن. بشكل عام تستهلك التحلية بالتناضح العكسي طاقة أقل من الطرق الحرارية (جدول ٧)، فضلاً عن أنها تتميز بمعدل استخلاص للمياه أعلى نسبياً (يمكن إنتاج طن من المياه المحلاة باستخدام

من ٢.٥ - ٣.٢ طن من ماء البحر).P١٠٦P37F في المقابل تصنع أغشية التناضح العكسي كما سبق وأشرنا من أسيتات السليولوز أو البوليمرات المركبة، وهي عرضة للتحشف الذي يؤثر سلبياً على أداء محطة التحلية (انخفاض كل من العمر الإنتاجي للأغشية، السعة الإنتاجية للمحطة، وجودة المياه المنتجة).P١٠٧P38F لذلك يلزم إجراء معالجة شاملة لماء التغذية قبل تمريره على عناصر الأغشية لتقليل التحشف (إزالة الجسيمات والمواد العضوية والتخلص من البكتيريا والكائنات الدقيقة الأخرى)، وهو ما يزيد من التكلفة النهائية للمياه المنتجة. علاوة على ذلك يتطلب التشغيل الصحيح لمحطات التناضح العكسي مهارات أعلى في المستوى.

جدول ٧: بيانات الطاقة الخاصة بطرق التحلية الرئيسية. المصدر: EU (2008)

	ت ل م	ت م ت	ت ع م ب	ف ك
حرارة التشغيل، °س	٩٠ - ١١٠	٧٠	المحيطة	المحيطة
احتياج الكهرباء، كوس/مP٣P	٢.٥ - ٣.٥	١.٥ - ٢.٥	٣.٥ - ٥.٥	١.٥ - ٤.٠ لمياه تغذية بها ١٥٠٠ - ٣٥٠٠ جفم من مصدر
احتياج الطاقة الحرارية، جفم/مP٣P	٨٠.٦	٨٠.٠	.	.

ت ل م: تقطير لحظي متعدد؛ ت م ت: تقطير متعدد التأثير؛ ت ع م ب: تناضح عكسي لماء البحر؛ ف ك: فصل كهربي؛ كوس/مP٣P: كيلووات. ساعة للمتر المكعب؛ ج ف م: جزء في المليون

[١٠٦] أنظر The Saudi Arabian Water Environment Association (2013).

[١٠٧] استبدال الأغشية عملية مكلفة.

أما طريقة التقطير اللحظي فتعتبر أبسط في التشغيل نسبياً، حيث أنها تحتاج إلى معالجة سابقة ومهارات أقل. كما أنها تتميز بالقدرة على تحلية كميات كبيرة من المياه المالحة وإنتاج مياه عالية النقاء. إلا أنها تستهلك طاقة عالية، ومن ثم تعتبر الأكثر تكلفة. يقل كذلك معدل استخلاص المياه العذبة في التقطير اللحظي عنه في التناضح العكسي؛ إذ يتطلب إنتاج طن من المياه المحلاة بهذه الطريقة استخدام من ٨ - ١٠ أطنان من ماء البحر.P١٠٨P39F

كثيراً ما يتم الجمع بين عمليتي التقطير اللحظي وتوليد الكهرباء في محطة واحدة لتقليل الطاقة المطلوبة للتحلية، حيث يستفاد من *الحرارة المفقودة* (أو *الضائعة*) ***waste heat*** من وحدات توليد الكهرباء في تسخين مياه التغذية المالحة في وحدات التحلية. تعرف هذه المحطات اختصاراً بسم *محطات التوليد المشترك* ***co-generation plants***.

يعد التقطير متعدد التأثير من أقدم طرق تحلية المياه. وهو مثل التقطير اللحظي لا يتطلب سوى معالجة سابقة بسيطة وينتج مياه عالية النقاء. غير أنه يعطي معدل استخلاص مياه أعلى من التقطير اللحظي، فيستخلص طنا من المياه المحلاة من كل ٥ - ٨ أطنان من مياه البحر. لكنه مقارنة مع التناضح العكسي يحتاج لطاقة أعلى ويعطي استخلاصاً أقل.

---

[١٠٨] أنظر Ludwig (2010).

٦. المعالجة السابقة والمعالجة اللاحقة

سنتناول بإيجاز في هذا الجزء نوعين من المعالجة التي تجرى بمحطات التحلية: (١) المعالجة السابقة التي تجرى للماء المالح قبل التحلية و(٢) المعالجة اللاحقة التي تجرى للمياه المحلاة قبل توزيعها على المستخدمين.

المعالجة السابقة

تهدف *المعالجة السابقة* أو *الأولية pretreatment* إلى تنقية الماء المالح (أي *المياه الخام raw water* أو *مياه التغذية feed water*) من المواد والأحياء الدقيقة العالقة بها، والتي تضر بمعدات التحلية (وخاصة أغشية التناضح العكسي).

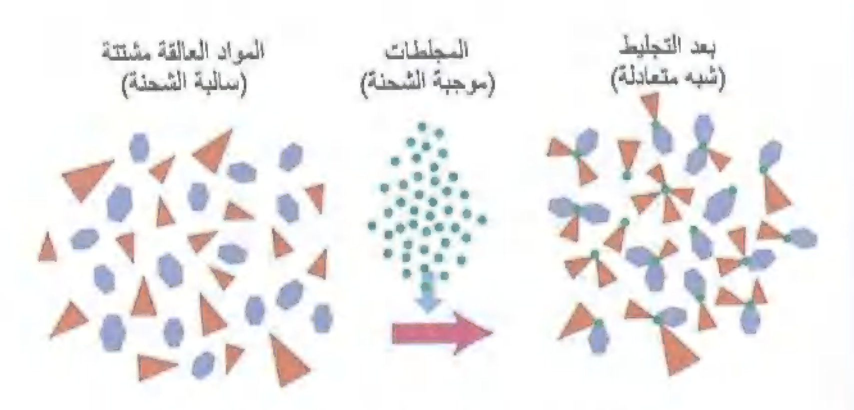
تشتمل المعالجة السابقة التقليدية على العمليات التالية:

الكلورة. كثيراً ما يضاف الكلور (*الكلورة chlorination*) إلى مياه التغذية لقتل الكائنات الدقيقة والحد من مشاكل التحشف الحيوي. استخدمت *الكلورة المستمرة continueous chlorination* تاريخياً بمستويات تصل إلى ٥ مج/ل، وذلك عندما كانت أغشية التناضح العكسي تصنع من أسيتات السليولوز. لكن *الكلورة بالدفعات المتقطعة intermittent shock chlorination* أصبحت أكثر شيوعاً بعد استخدام الأغشية المركبة الرقيقة سريعة التلف بفعل الكلور.

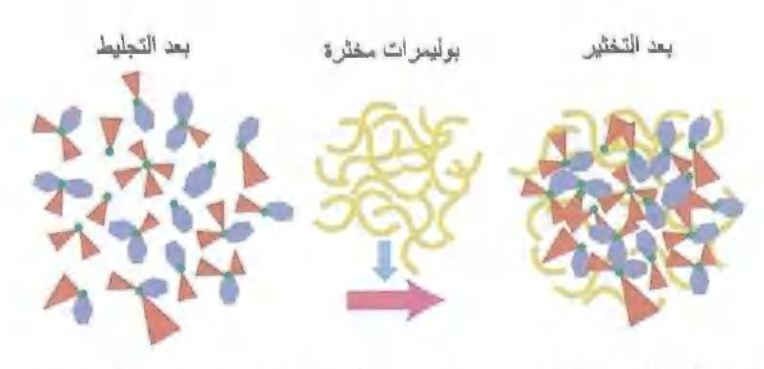
التجليط والتخثير والترويق. يجرى فصل المواد المعلقة والغروية عن الماء المالح الخام باستخدام عمليتي *التجليط coagulation* و*التخثير flocculation*. التجليط هو العملية الكيميائية التي تشمل إضافة بعض الكيماويات (*مجلطات coagulants*) التي تعمل على تجميع المواد المعلقة والغروية في شكل كتل صغيرة. تعمل هذه المجلطات على معادلة الشحنات الموجودة على الجسيمات المعلقة (السالبة في معظمها) ومن ثم تضعف قوى التنافر بينها (الشكل ٧٧). تعتبر أملاح الحديديك، مثل كلوريد وكبريتات الحديديك ($FeCl_3$

$Fe_2(SO_4)_3$ و، على التتابع)، من *المجلطات coagulants* شائعة الاستخدام (عادة بتركيز ٣ - ١٠ مج/ل . حديد). أما التخثير فيشير إلى عملية الخلط الميكانيكية البطيئة التي تعمل على تجميع الجلطات الصغيرة في تكتلات أكبر يمكن ترسيبها من المياه المعالجة. ويضاف أحياناً بعض البوليمرات التي تساعد على التخثر (الشكل ٧٨).

يترك الماء المالح بعد ذلك في *أحواض الترويق sedimentation tanks* ليستقر وتترسب منه العوالق المتخثرة.



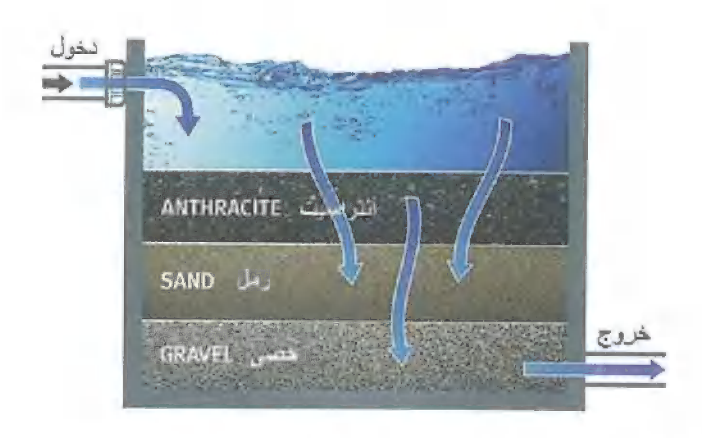
الشكل ٧٧: رسم توضيحي لعملية التجليط.



الشكل ٧٨: رسم توضيحي لعملية التخثير (بمساعدة البوليمرات).

الترشيح. عادة ما يجرى *الترشيح في الوسائط media filtration* باستخدام وسائط مزدوجة من الرمل وفحم الأنثراسيت anthracite أو وسائط مختلطة من الرمل، الأنثراسيت (أو الأنتراسيت كما ينطقها البعض)، والحصى (الشكل ٧٩)، وقد تستخدم البوليمرات كمواد مساعدة.[١٠٩]

إضافة مضادات التجير. غالباً ما يضاف حمض الكبريتيك لمنع تكون رواسب كربونات الكالسيوم، كما تستخدم *مثبطات التجير scale inhibitors* لمنع أو تأخير ترسب أملاح الكبريتات صعبة الذوبان.



الشكل ٧٩: رسم توضيحي لحوض ترشيح بالوسائط المختلطة.

الترشيح المعلب. تستخدم *المرشحات المعلبة cartridge filters* كخط دفاع أخير لمنع وصول الجسيمات الدقيقة إلى أغشية التناضح العكسي، وعادة ما تستخدم مرشحات من عيار ٥ μ (الشكل ٨٠).

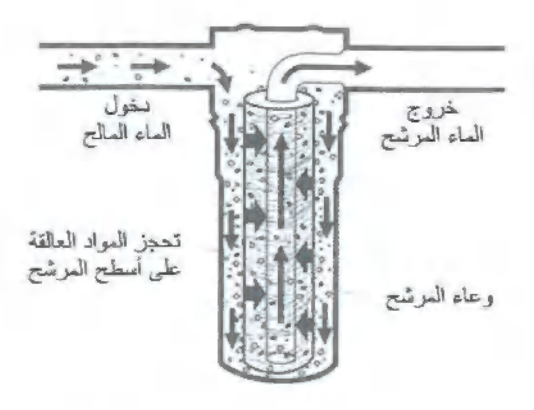
إزالة الكلور. تتعرض أغشية التناضح العكسي للأكسدة بفعل الكلور، ولذلك يجب إزالة الكلورين (الكلور) كله من المياه المعالجة قبل تحليتها بالتناضح العكسي. وغالباً ما يستخدم بيكبريتات الصوديوم sodium bisulfate (SBS) لذلك (الجرعات المعتادة ما بين ٣ - ٤ مج/ل).

---

[١٠٩] يعتبر الأنثراسيت من أجود أنواع الفحم الحجري. تصل نسبة الكربون فيه إلى ٩٢ - ٩٨%. يتميز بأنه قاس وبراق ولا ينتج عن احتراقه سوى القليل من الدخان.

معالجة الماء المنتج

ينتج عن عمليات التقطير الحراري مياه ذات تركيزات منخفضة جداً من المواد الذائبة (مياه مقطرة). الماء الخالي من المواد الذائبة غير سائغ، كما ينقصه بعض العناصر الموجودة في المياه العذبة طبيعياً والضرورية لصحة الإنسان (جدول ٨). لذلك يلزم إضافة بعض المواد الذائبة (والهواء) مجدداً إلى المياه الناتجة من عملية التحلية. وعند تحلية ماء الآبار المسوس عادة ما يجرى ذلك بخلط جزء من مياه التغذية بالمياه المحلاة الناتجة. يجرى كذلك تهوية المياه، وتضاف بعض الكيماويات التي تقلل من قدرتها على إحداث التآكل في شبكة إمدادات المياه. وبالطبع يضاف إليها المطهرات (عادة الكلور) قبل توزيعها على المستخدمين.



الشكل ٨٠: رسم توضيحي لمرشح معلب.

أما المياه الناتجة من عمليات الأغشية فتحتوي على تركيزات أعلى من المواد الذائبة، ولا يلزم عادة خلطها ببعض من مياه التغذية كما هو الحال في التقطير الحراري. لكن يضاف إليها الهواء والمطهرات بالإضافة إلى المواد التي تقلل من قدرتها على إحداث التآكل.

جدول ٨: العناصر الكيميائية الموجودة في المياه الطبيعية. المصدر: Hasson & Bendrihem (2006)

العنصر	التركيز (مج/ل)
كالسيوم	٣٠ - ١٥٠
ماغنسيوم	٠ - ١٠٠
صوديوم	٣٠ - ١٥٠
كلور	٠ - ٢٠٠
كبريتات	٠ - ٢٠٠
المواد الصلبة الذائبة	٤٠٠

إزالة البورون

البور . ركيزات منخفضة (أقل من ١.٠ مج/ل) هو عنصر ضروري لنمو النبات، ولذلك ضاف إلى الأسمدة الزراعية. لكنه ينقلب ساماً لها عند زيادته (الشكل ٨١). تتباين المحاصيل في حساسيتها لزيادة البورون في مياه التربة، لكن التركيزات الأعلى من ٢ مج/ل تضر معظمها (جدول ٩). تعد أشجار الموالح من أكثر المحاصيل حساسية لزيادة البورون، إذ تتضرر أوراقها كثيراً إذا زاد تركيزه في مياه الري عن ٠.٣ مج/ل.P40F[١١٠]

يحتوي جسم الإنسان على كميات ضئيلة من البورون (نحو ٠.٧ ج ف م) تدخل إليه عن طريق الغذاء. لا يعد البورون من العناصر الضرورية للإنسان لكن نقصه قد يسبب عدة مشاكل صحية. أعراض نقص البورون في الإنسان ليست جميعها مفهومة جيدا، ولكن من المعروف أن نقصانه قد يخل بالأيض (التمثيل الغذائي) الطبيعي للكالسيوم والماغنسيوم.

[١١٠] أنظر EPA (1975).

تشمل الأعراض الأخرى لنقص البورون *زيادة نشاط الغدة الدرقية hyperthyroidism*، *لاتوازن الهرمونات الجنسية sex hormone imbalance*، *هشاشة العظام osteoporosis*، *التهاب المفاصل arthritis*، والاختلالات العصبية.P١١١P41F



الشكل ٨١: حروق البورون على أوراق شجيرة الفراولة (*Arbutus unedo*).

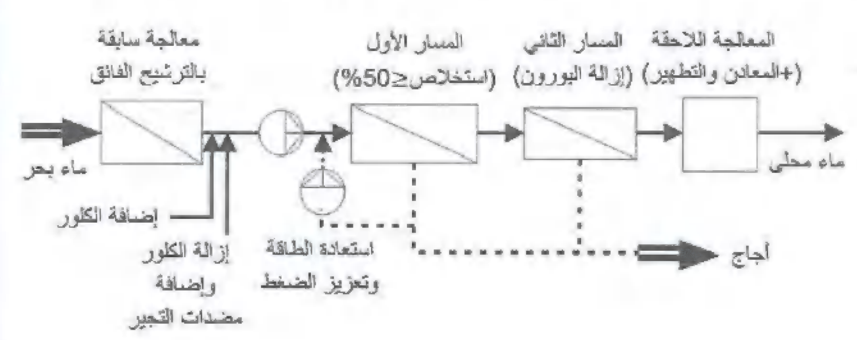
في المقابل فإن التركيزات العالية من البورون هي أيضاً ضارة للإنسان: تسبب الجرعات اليومية الأكبر من ٥ مج من حامض البوريك الغثيان، القيء، الإسهال، وتجلط الدم؛ أما الكميات الأعلى من ٢٠ مج فقد تكون مميتة. يوجد كذلك ارتباط غير مؤكد بين تركيزات البورون في التربة ومياه الشرب من ناحية واحتمال إصابة الإنسان بالتهاب المفاصل من ناحية أخرى. كما يشتبه في وجود علاقة إحصائية بين زيادة البورون الذي يدخل جسم الإنسان وحدوث بعض التشوهات التكوينية في المواليد. لذلك توصي منظمة الصحة العالمية بألا يزيد تركيز البورون في مياه الشرب عن ٠.٥ مج/ل (تتطلب معايير الاتحاد الأوربي أن يقل عن ١.٠ مج/ل).

---

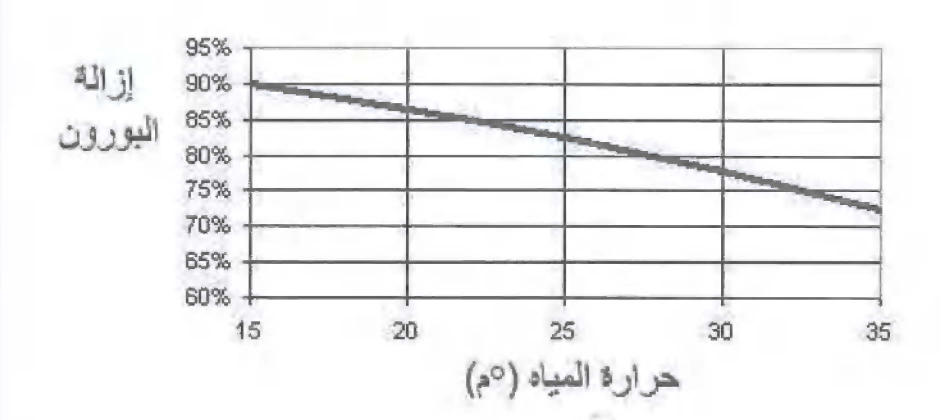
[١١١] لمزيد من المعلومات عن علاقة البورون بصحة الإنسان أنظر الموقع التالي: https://medlineplus.gov/druginfo/natural/894.html.

يتراوح وجود البورون في ماء البحر ما بين ٤ - ٥.٥ مج/ل، وقد يصل تركيزه إلى ٧ مج/ل في البحار الحارة مثل الخليج والبحرين الأحمر والكاريبي. وتستطيع أغشية التناضح العكسي الاعتيادية إزالة مابين ٧٣ - ٩٠% من البورون (عند *رقم حموضة* ٨) وفقاً لحرارة المياه (الشكل ٨٢). تقل كفاءة الأغشية بارتفاع درجة الحرارة، فعند درجة ٣٠°س مثلاً تهبط النسبة التي يتم فصلها من البورون إلى ٧٨%، مما يترك نحو ١.١٥ مج/ل منه في المياه المنتجة، وهذا يتطلب عملية خاصة لخفضه إلى أقل من ٠.٥ مج/ل (كما توصي بذلك هيئة الصحة

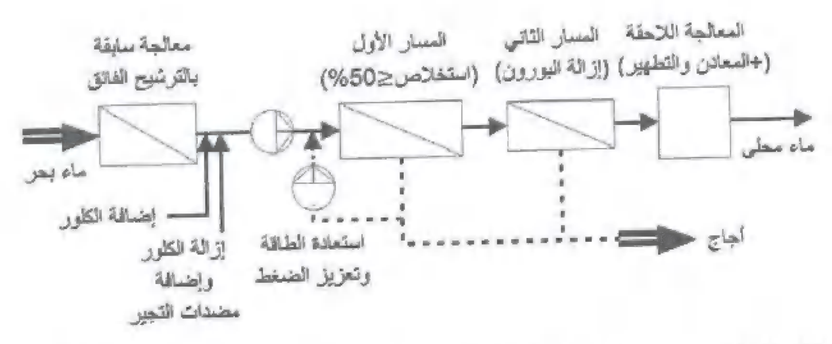
-pass)



الشكل ٨٣) أو أغشية فصل خاصة أو الاثنين معاً (تستطيع بعض الأغشية الخاصة إزالة ٩٥% من البورون).



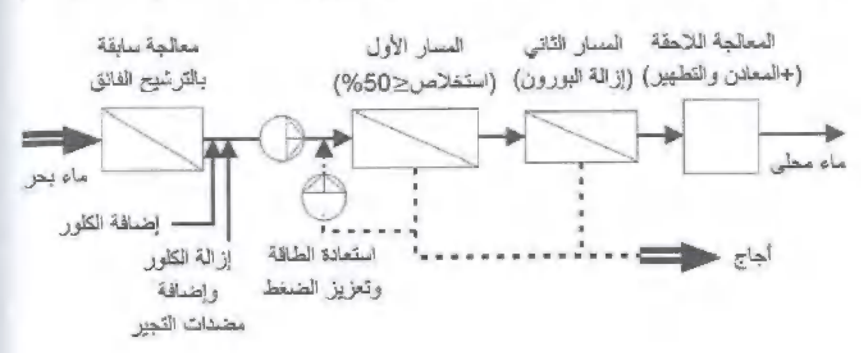
الشكل ٨٢: علاقة إزالة البورون بدرجة الحرارة. المصدر: Lenntech



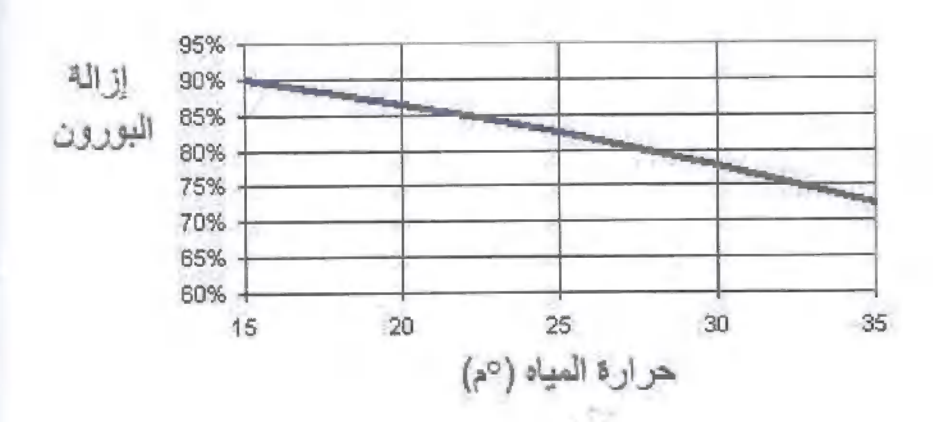
الشكل ٨٣: رسم تخطيطي لعملية تحلية بالتناضح العكسي مزدوج المسار.

يتراوح وجود البورون في ماء البحر ما بين ٤ - ٥.٥ مج/ل، وقد يصل تركيزه إلى ٧ مج/ل في البحار الحارة مثل الخليج والبحرين الأحمر والكاريبي. وتستطيع أغشية التناضح العكسي الاعتيادية إزالة مابين ٧٣ - ٩٠% من البورون (عند رقم حموضة ٨) وفقاً لحرارة المياه (الشكل ٨٢). تقل كفاءة الأغشية بارتفاع درجة الحرارة، فعند درجة ٣٠°س مثلاً تهبط النسبة التي يتم فصلها من البورون إلى ٧٨%، مما يترك نحو ١.١٥ مج/ل منه في المياه المنتجة، وهذا يتطلب عملية خاصة لخفضه إلى أقل من ٠.٥ مج/ل (كما توصي بذلك هيئة الصحة

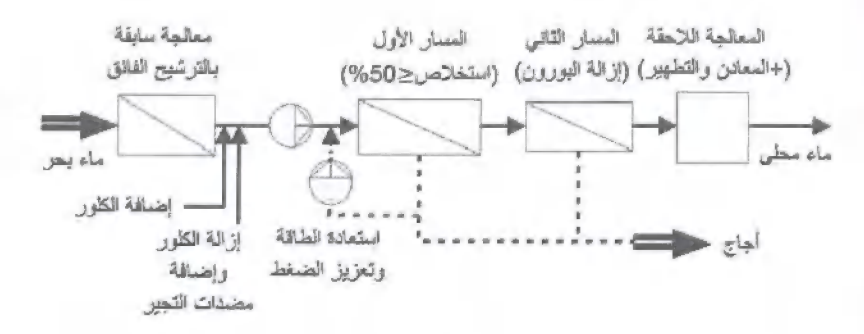
-pass)



الشكل ٨٣) أو أغشية فصل خاصة أو الاثنين معاً (تستطيع بعض الأغشية الخاصة إزالة ٩٥% من البورون).



الشكل ٨٢: علاقة إزالة البورون بدرجة الحرارة. المصدر: Lenntech



الشكل ٨٣: رسم تخطيطي لعملية تحلية بالتناضح العكسي مزدوج المسار.

جدول ٩: المحاصيل الحساسة والحمالة للبورون.

التحمل	تركيز البورون (م ج/ل)	المحصول
حساسة جدا	< ٠.٥	التوت الأسمر
حساسة	٠.٥ - ١.٠	الخوخ، الكرز، البرقوق، العنب، اللوبيا، البصل، الثوم، البطاطا الحلوة، القمح، الشعير، عباد الشمس، السمسم، الفراولة
متوسطة الحساسية	١.٠ - ٢.٠	الفلفل الأحمر، البسلة، الجزر، الفجل، البطاطس، الخيار
متوسطة التحمل	٢.٠ - ٤.٠	الخس، الكرنب، الكرفس، اللفت، الشوفان، الذرة، الخرشوف، التبغ، القرع
حمالة	٤.٠ - ٦.٠	الطماطم، الفصة (البرسيم الأحمر)، البقدونس، بنجر السكر
حمالة جدا	٦.٠ - ١٥.٠	الأسبرجس

٧. اقتصاديات التحلية

حتى وقت قريب كان ينظر إلى توفير الاحتياجات المتزايدة للمياه العذبة عن طريق تحلية المياه المالحة على أنه خيار مكلف جداً لا يناسب إلا الدول الغنية. لكن مع الانخفاض الكبير الذي حدث في تكاليف التحلية خلال العقود الماضية، وندرة الموارد المائية الطبيعية غير المستغلة، بدأت دول عديدة تنظر إلى التحلية باعتبارها "خيار قابل للتطبيق". وقد بدأ القطاع الخاص في الآونة الآخيرة يشارك بشكل متزايد في تمويل مشروعات التحلية.

تكاليف التحلية P42F[١١٢]

يتساءل البعض عن التكلفة الحالية للمياه المحلاة والأسعار التي تباع بها. الإجابة المختصرة على هذا السؤال هي أن هذه التكلفة قد انخفضت كثيراً منذ بداية استخدام التحلية حتى وصلت إلى ما دون النصف دولار للمتر المكعب بالنسبة لماء البحر في بعض الحالات (التحلية بالتناضح العكسي في المحطات الكبيرة والحديثة)، وأن المتر المكعب منها يباع عادة بما يعادل دولاراً واحداً إلى دولارين أمريكيين.P[١١٣]P43F قد لا تكون هذه الإجابة مفيدة كثيرا؛ فتكاليف التحلية تتوقف على عوامل عديدة مثل مكان التحلية، ملوحة الماء الخام، التقنية المستخدمة، والسعة الإنتاجية (جدول ١٠).

يعتبر مقدار الطاقة المستخدمة العامل الرئيسي في تحديد تكلفة التحلية، سواء في التقطير الحراري أو التحلية بالأغشية (الشكل ٨٤ والشكل ٨٥). ونظراً لأن أسعار الطاقة يمكن أن

[١١٢] نظرا للأنخفاض الكبير في تكاليف التحلية في العقود الماضية، ولارتباطها بعوامل عديدة تتباين من مكان لآخر (مثل أسعار أنواع الوقود الأحفوري)، سيلاحظ القاريء تباينا (وربما تضاربا) ملحوظا في البيانات الواردة في هذا الجزء.

[١١٣] أنظر Isaka (2012). في السعودية، كان المتر المكعب من المياه المحلاة يباع بستة ريالات (١.٦٠$) في ٢٠١٥. عادة ما تكون تكلفة التحلية بالتناضح العكسي لماء البحر أعلى منها للماء المسوس، وذلك لأن ارتفاع ملوحة ماء التغذية يتطلب استخدام ضغط أعلى للتغلب على ضغط التناضح الطبيعي (راجع الجزء الخاص بالتحلية بالتناضح العكسي).

جدول ١٠: تكاليف المياه المحلاة. المصدر: مستقاه من (2014) .Zotalis et al ومصادر أخرى

نوع المياه	التقنية المستخدمة	سعة المحطة (م٣/يوم)	التكلفة (P٣Pم/$)
		٢٠ >	٩.٥٧ - ٤.١٧
ماء مسوس	ت ع	١٢٠٠ - ٢٠	٠.٩٨ - ٠.٥٨
		٤٦٠٠٠ - ٤٠٠٠٠	٠.٤٠ - ٠.١٩
		١٠٠ >	١٣.٩١ - ١.٠٨
		١٠٠٠ - ٢٥٠	٢.٩١ - ٠.٩٣
ماء بحر	ت ع	٤٨٠٠ - ١٠٠٠	١.٣٩ - ٠.٥٢
		٦٠٠٠٠ - ١٥٠٠٠	١.٢١ - ٠.٣٣
		٣٢٠٠٠٠ - ١٠٠٠٠٠	٠.٤٩ - ٠.٣٩
		١٠٠ >	٧.٤٣ - ١.٨٥
ماء بحر	ت ل م	٥٥٠٠٠ - ١٢٠٠٠	١.١١ - ٠.٧١
		٩١٠٠٠ <	٠.٧٥ - ٠.٣٩
ماء بحر	ت م ت	٥٢٨٠٠٠ - ٢٣٠٠٠	١.٣٠ - ٠.٣٩
ماء بحر	ت ض ب	١٢٠٠ - ١٠٠٠	١.٩٧ - ١.٤٩

تتغير سريعاً وبشكل غير متوقع، نتيجة للتغيرات في أسعار النفط والسياسات الحكومية، تتقلب بالتالي تكاليف التحلية النهائية.

عادة ما يتم تقسيم إجمالي تكاليف التحلية إلى *تكلفة الاستثمار investment cost*، *وتكلفة التشغيل والصيانة operation and maintenance cost*. تشمل تكاليف الاستثمار تلك التكاليف التي تدفع عادة في مرحلة تشييد محطة التحلية مثل الأرض، المعدات، والإنشاءات بينما تتضمن تكلفة التشغيل والصيانة التكاليف المتغيرة مثل الطاقة، الإصلاح، والأفراد.

وقد تصل تكلفة الطاقة - وفقاً لتقرير للحكومة الأسترالية - إلى ٦٠% من تكلفة تشغيل وصيانة محطات التحلية العاملة.P[١١٤]P44F وفي دراسة أخرى تشكل تكلفة الطاقة ما بين ٤٦ - ٧٣% من تكلفة المياه المحلاة الكلية، حسب ملوحة المياه المستخدمة وأسعار النفط.P[١١٥]P45F ويقدر بعض الباحثين في مقال حديث نسبياً أن الطاقة الكهربية المستخدمة في تحلية ماء البحر بالتناضح العكسي (ت ع م ب) تشكل ما بين ١٩ - ٤٠% من تكاليف المياه الكلية.P46F[١١٦]

تظهر بعض الدراسات الحديثة أن ملوحة ماء التغذية وتكاليف الطاقة المستخدمة تؤثر بشكل مباشر على السعر النهائي للمياه المحلاة.P[١١٧]P47F كما توجد *علاقة طردية خطية وارتباط إحصائي statistical correlation* قوي بين أسعار الطاقة (دولار/ميجاوات. ساعة) والأسعار النهائية للمياه المحلاة (دولار/كيلوجالون) (الشكل ٨٦). ونظراً لأن تقنيات التحلية بالأغشية تحتاج كميات أقل من الطاقة مقارنة مع التقنيات الحرارية، تكون تكلفة المياه المنتجة بها في أغلب الحالات أقل منها في الثانية (الشكل ٨٧).

لقد تطورت تقنيات التحلية كثيراً وانخفضت احتياجاتها من الطاقة. صاحب هذا الانخفاض في استهلاك الطاقة انخفاضاً موازياً في تكلفة الوحدة المنتجة (**Error! Reference source not found.** والشكل ٨٩). ولا يعزى هذا الانخفاض في التكلفة فقط إلى التطور التقني وإنما

[١١٤] أنظر Australian Government (2008).

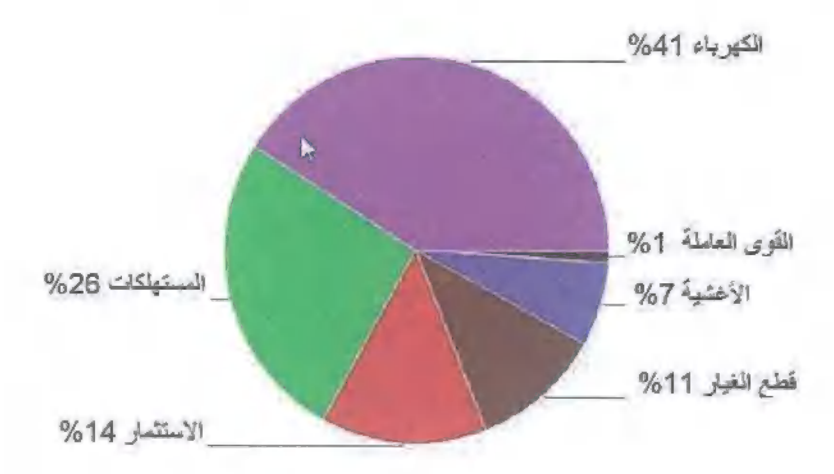
[١١٥] أنظر Mabrouk et al. (2010).

[١١٦] المرجع السابق.

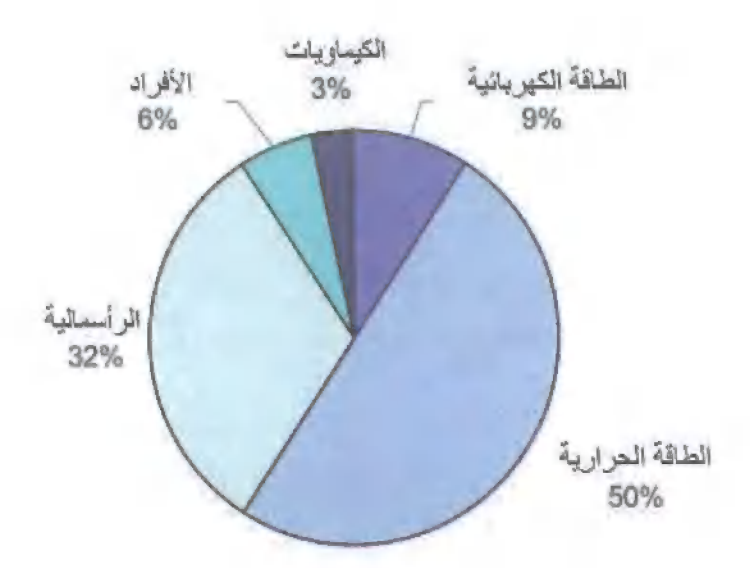
[١١٧] أنظر Ziolkowska (2015).

أيضاً إلى ما يعرف في لغة الاقتصاد بـ *وفرات السعة economies of scale* (انخفاض التكلفة بسبب زيادة السعة الإنتاجية لمحطات التحلية).

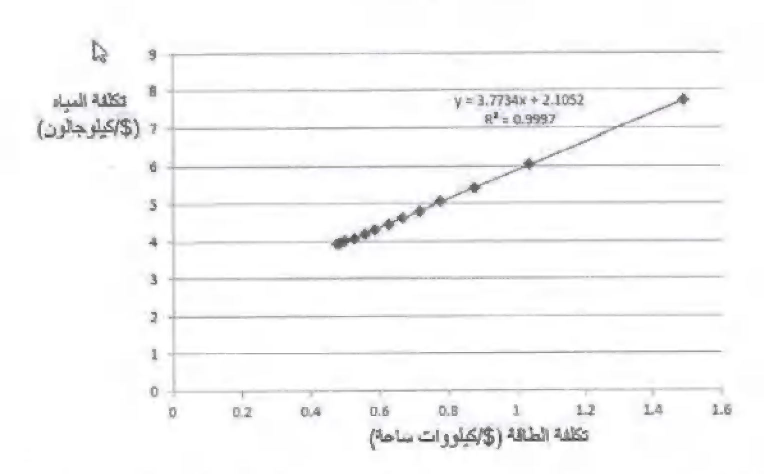
عادة ما يتم في دول الخليج الجمع بين تحلية المياه وتوليد الكهرباء في مشروع واحد (محطة توليد مشترك). يعمل هذا الترتيب على خفض الطاقة المستخدمة ومجمل التأثيرات البيئية السلبية؛ تستخدم وحدات توليد الكهرباء ووحدات التحلية نفس منظومات السحب والصرف، كما يمكن الاستفادة من بعض الحرارة المفقودة أثناء توليد الكهرباء في تسخين مياه التغذية بوحدات التحلية أو استخدام مياه التبريد الخارجة من وحدات توليد الكهرباء في تخفيف ملوحة الأجاج (الناتج من عملية التحلية) قبل صرفه على البحر.



الشكل ٨٤: تفصيل تكاليف التحلية بالتناضح العكسي. المصدر: Lenntech

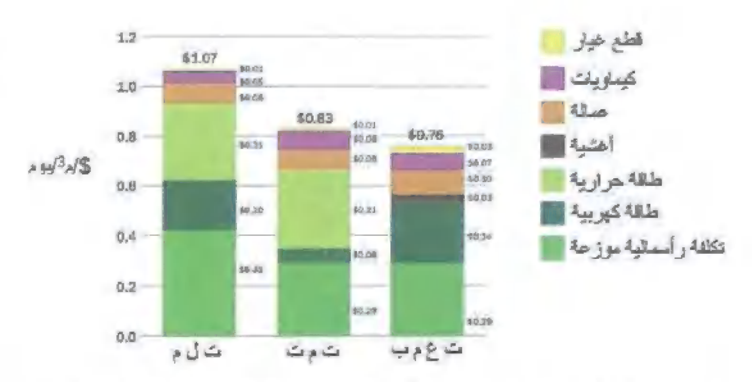


الشكل ٨٥: تفصيل تكاليف التحلية بالتقطير الحراري. المصدر: US National Research Council (2004)

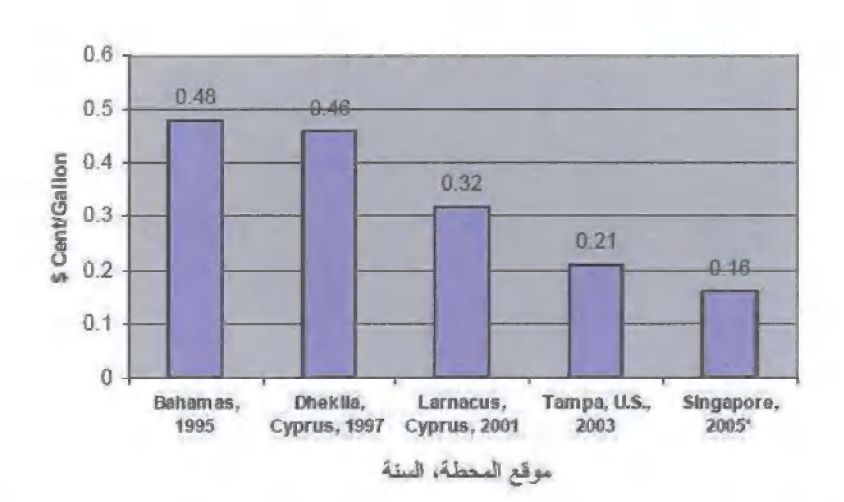


الشكل ٨٦: العلاقة بين تكاليف المياه والطاقة لمستويات ملوحة بين ١٠٠٠ و ٥٥٠٠٠.

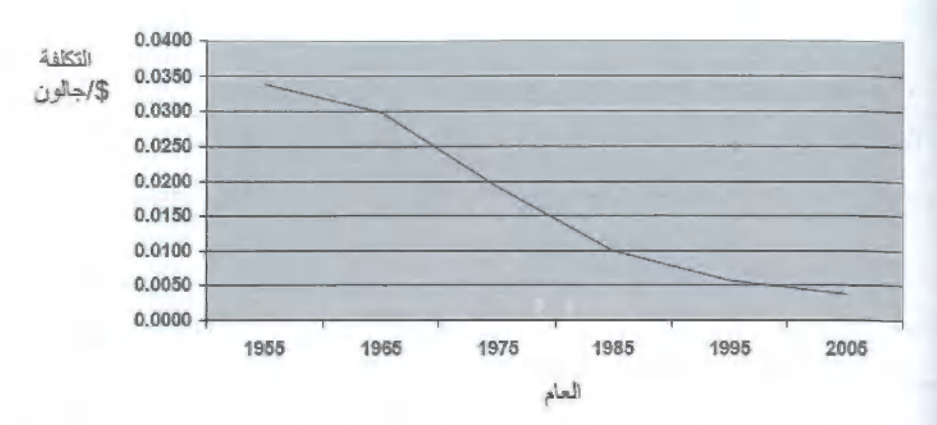
المصدر: Ziolkowska (2015)



الشكل ٨٧: تكاليف التشغيل النسبية لطرق التحلية الثلاثة الأساسية. المصدر: Müller (2003)و DesalData.com (2013)



الشكل ٨٨: تطور تكلفة الوحدة المنتجة من تحلية ماء البحر بالتناضح العكسي. المصدر: Ebensperger & Isley (2005)



الشكل ٨٩: تكلفة الجالون من المياه المنتجة بالتقطير اللحظي في الفترة من ١٩٩٥ إلى ٢٠٠٥. المصدر: Ebensperger & Phyllis (2005)

التناضح العكسي كان ومازال أكثر تقنيات التحلية كفاءة في استخدام الطاقة. وقد صنفته وكالة الحماية البيئية الأمريكية US Environmental Protection Agency (EPA) في بداية تسعينات القرن الماضي باعتباره "أفضل تقنية متاحة best available technology" لتحلية المياه.P١١٨P48F وباستبعاد تلك الموجودة في منطقة الخليج تستخدم الغالبية العظمى من محطات التحلية التي أنشئت في العقدين الماضيين والمخطط إنشائها قريباً. تستخدم تقنية التناضح العكسي.

هناك توجه صاعد في منطقة الخليج لاستخدام طريقة التناضح العكسي وإحدى الطرق الحرارية في محطة واحدة (فيما يعرف بسم المحطات أو التحلية *الهجينة hybrid*). الفكرة الأساسية من المحطات الهجينة هي الجمع بين مزايا الطريقتين. على سبيل المثال يمكن خلط المياه المحلاة بالتقطير الحراري (الأكثر نقاوة) مع تلك المحلاة بالتناضح العكسي (الأقل تكلفة) بنسب معينة للحصول على النوعية المطلوبة من المياه المنتجة. كما يمكن

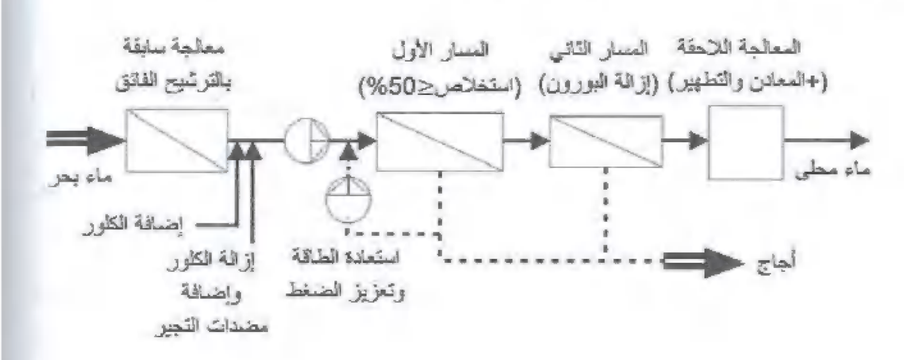
---

[١١٨] أنظر Watereuse (2012). يعتبر استخدام "أفضل تقنية متاحة" في المشروع الجديد مؤشرا على التزام صاحب المشروع بالمتطلبات البيئية.

خلط الأجاج الناتج عن العملتين لخفض حرارة وملوحة أجاج التقطير الحراري قبل صرفه على البحر.

يؤدي الجمع بين الطريقتين إلى خفض التكاليف الاستثمارية والكلية للمياه المحلاة. قد يبلغ على سبيل المثال الخفض في التكلفة الكلية للمياه في محطة قدرتها ١٥٠٠٠٠ مP٣P/يوم نحو ٠.٠٦٤ $/مP٣P. يحقق هذا الوفر (والذي قد يبدو ضئيلاً للوهلة الأولى) منافع اقتصادية بقيمة ٣.٤ مليون دولار سنوياً (بالإضافة للمنافع البيئية العديدة).P49F[١١٩]

فكرة التحلية الهجينة ليست جديدة، إذ تعود إلى آواخر ثمنينات القرن الماضي، ولكن لا ينتشر تطبيق الأفكار المبتكرة عادة إلا بمرور الزمن. كان الهدف من الفكرة في بدايتها هو تحسين نوعية المياه المنتجة بالتناضح العكسي (تقليل نسبة الأملاح بها) دون الحاجة لاستخدام " في عملية التحلية (second pass"مسار ثان



الشكل ٨٣). اليوم ورغم مقدرة محطات التناضح العكسي الحديثة على إنتاج مياه مقبولة للشرب خلال مسار واحد فقط مازال الخلط بين المياه المنتجة بالطريقتين (التناضح العكسي والحرارية) يعتبر الحل الأبسط لخفض تركيز البورون في "راشح permeate" التناضح العكسي إلى ما دون ٠.٥ مج/ل في الحالات التي تتطلب ذلك.P50F[١٢٠]

[١١٩] أنظر Ghaffour et al. (2013).

[١٢٠] أنظر Awerbuch (undated).

طبقت التحلية الهجينة لأول مرة في "محطة جده" بالسعودية في العام ١٩٨٩، حيث جرى خلط المياه الناتجة من عملية التناضح العكسي (ذات مواد صلبة ذائبة أعلى) بالمياه المحلاة التي كانت تنتجها المحطة أصلاً بطريقة التقطير اللحظي. وقد عاد الاهتمام مجدداً بالأنظمة الهجينة في دول الخليج؛ إذ يجرى استخدامها في محطات "الفجيرة ١" و"الفجيرة ٢" بالإمارات، "رأس الخير" بالسعودية، "الزور الجنوبية" بالكويت، و"المحطة د" في قطر.P[١٢١]P51F

بشكل عام تزيد تكاليف التحلية لماء البحر عنها للماء المسوس (بسبب زيادة الطاقة المستخدمة مع زيادة ملوحة مياه التغذية في محطات التناضح العكسي)، وتنخفض التكاليف مع زيادة السعة الإنتاجية للمحطة (نتيجة للاستفادة من وفرات السعة) (جدول ١١).

بالرغم من الانخفاض الكبير في تكاليف التحلية (لكل تقنيات التحلية بما فيها الحرارية) إلا أنها ما تزال أعلى من تكاليف إنتاج المياه العذبة من الموارد التقليدية (جدول ١٢). ولذلك عادة ما تدعم الحكومات إنتاج المياه المحلاة، إما مباشرة أو من خلال دعم مصادر الطاقة المستخدمة في محطات التحلية.

أحياناً ما تكون تكاليف نقل المياه (المحلاة أو المنتجة من موارد المياه العذبة الطبيعية) هي العامل الرئيسي المحدد للجدوى الاقتصادية لمشروعات التحلية. على سبيل المثال قد تكون تحلية مياه الآبار المحلية هي الخيار الأقل تكلفة في الأماكن النائية البعيدة عن مصادر المياه العذبة الطبيعية (مثل مواقع المنتجعات السياحية أو حقول البترول الصحراوية). في المقابل قد تصبح تحلية ماء البحر خياراً مكلفاً جداً إذا كان سيجرى نقل المياه المحلاة إلى أماكن داخلية بعيدة عن الساحل أو مرتفعة عن سطح البحر. ومع ذلك قد يكون هذا هو الخيار الوحيد المتاح والمقبول من الناحية الاستراتيجية. على سبيل المثال يجرى نقل المياه المحلاة إلى العاصمة السعودية (الرياض) عبر خط أنابيب يمتد لمسافة ٣٢٠ كيلومتراً من محطة "الجبيل" على الساحل الشرقي للمملكة (

الشكل ٩٠).P52F[١٢٢]

---

[١٢١] المرجع السابق

[١٢٢] أنظر (2008) Conway.



الشكل ٩٠: محطات التحلية بالمملكة العربية السعودية. المصدر: SWCC 37TU

يبين جدول ١٣ الطاقة المستخدمة، التكلفة الرأسمالية، و*تكلفة المياه الكلية total water cost* لطرق التحلية الثلاثة الرئيسية. نلاحظ أن أكثرها استخداماً للطاقة، وبالتالي أكثرها تكلفة، هي طريقة التقطير اللحظي متعدد المراحل. تتقارب تكاليف تحلية ماء البحر (الرأسمالية والكلية) بطريقة التقطير متعدد التأثيرمع تكاليف تحليتها بطريقة التناضح العكسي، ولكنها تظل أعلى منها في الطاقة المستخدمة. تقل بشكل عام تكاليف تحلية الماء المسوس عن نصف تكاليف تحلية ماء البحر (في التناضح العكسي).

تتراوح التكلفة الرأسمالية لمحطات التناضح العكسي الحديثة والكبيرة (التي لا تقل سعتها عن ١٠٠٠٠ م^{٣}/يوم) ما بين ٩٠٠ـ ١٢٠٠ $/م^{٣}/يوم (دولار لكل متر مكعب في اليوم). تصل هذه التكلفة إلى ٢٥٠٠ $/م^{٣}/يوم في المحطات الصغيرة.P53F[١٢٣] تتوزع تكاليف الإنشاء لمحطة "نموذجية" تنازلياً كالتالي:

إنشاء منظومة التناضح العكسي	٣١%
الكهرباء	٢٦ %
إنشاء السحب والصرف	١١%

[١٢٣] أنظر (2013) Ghaffour et al. على سبيل المثال، تتراوح تكلفة إنشاء محطة ذات سعة ١٠٠٠٠ م^{٣}/يوم ما بين ٩ - ١٢ مليون دولار.

إنشاء المعالجة السابقة ١٠٪

تصميم المشروع والتصريح به ٧٪

إحلال معدات التناضح العكسي ٦٪

يجب أن نلحظ أن هذا مجرد مثال لتوزيع تكاليف إنشاء محطة تحلية بالتناضح العكسي، وهناك العديد من العوامل (مثل أسعار الطاقة والقوى العاملة) التي قد تغير من هذه النسب كثيراً (سنرى ذلك مباشرة في الشكل ٩١).

أنظمة سحب المياه وصرف الأجاج وجودة مياه التغذية هي أيضاً من ضمن العوامل العديدة التي تؤثر على تكاليف التحلية بالتناضح العكسي لماء البحر (الشكل ٩٢).

جدول ١١: تكلفة انتاج المياه المحلاة من ماء البحر والماء المسوس. المصدر: Zotalis et al. (2014)

السعة (م³/يوم)	التكلفة (€/مP³P)	
	ماء بحر	ماء مسوس
٣ ٨٠٠	٠.٩٧	٠.٥٠
٧ ٦٠٠	٠.٧٠	٠.٢٧
١٩ ٠٠٠	٠.٥٤	٠.٢١
٣٨ ٠٠٠	٠.٥٠	٠.١٧
٥٧ ٠٠٠	٠.٤٩	٠.١٥

جدول ١٢: التكاليف الكلية للمياه في الولايات المتحدة حسب مصادرها. المصدر: AMTA (2007)

نوع المصدر	التكلفة للمستهلك ($/كجا)
المصادر التقليدية الموجودة	٠.٩٠ - ٢.٥٠
مياه محلاة	
ماء مسوس (١٠٠٠ - ٥٠٠٠ مصذ)	١.٥٠ - ٣.٠٠
ماء بحر (٣٠٠٠٠ - ٣٥٠٠٠ مصذ)	٣.٠٠ - ٨.٠٠
مياه خليط	
تقليدية (٥٠%) + مسوس (٥٠%)	١.٢٠ - ٢.٧٥
تقليدية (٩٠%) + بحر (١٠%)	١.١١ - ٣.٠٥

$/كجا: دولار لكل كيلوجالون؛ م ص ذ: مواد صلبة ذائبة

جدول ١٣: استهلاك الطاقة وتكاليف المياه لعمليات التحلية التجارية.

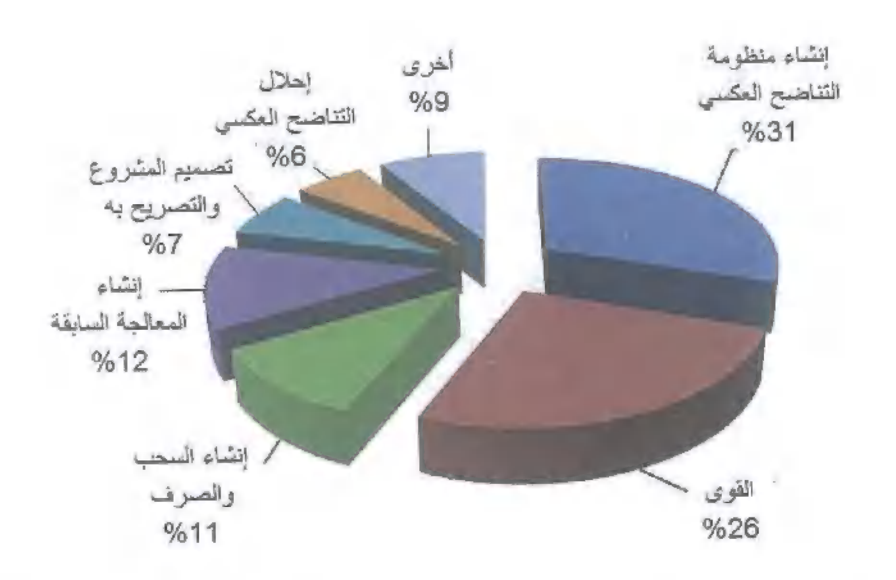
المصدر: Ghaffour et al. (2013)

العملية	طاقة حرارية كوس/م P³P	طاقة كهربية كوس/م P³P	طاقة كلية كوس/م P³P	تكلفة استثمارية $/مP³P/يوم	تكلفة الماء الكلية $/مP³P
ت ل م	٧.٥ -١٢	٢.٥ -٤	١٠ -١٦	١٢٠٠ -٢٥٠٠٠	(٠.٨ -١.٥)*
ت م ت	٤ -٧	١.٥ -٢	٥.٥ -٩	٩٠٠ -٢٠٠٠٠	٠.٧ -١.٣
ت ع م ب	-	(٣ -٤)**	٣ -٤	٩٠٠ -٢٥٠٠٠	٠.٥ -١.٣
ت ع م م	-	٠.٥ -٢.٥	٠.٥ -٢.٥	٣٠٠ -١٢٠٠٠	٠.٢ -٠.٤

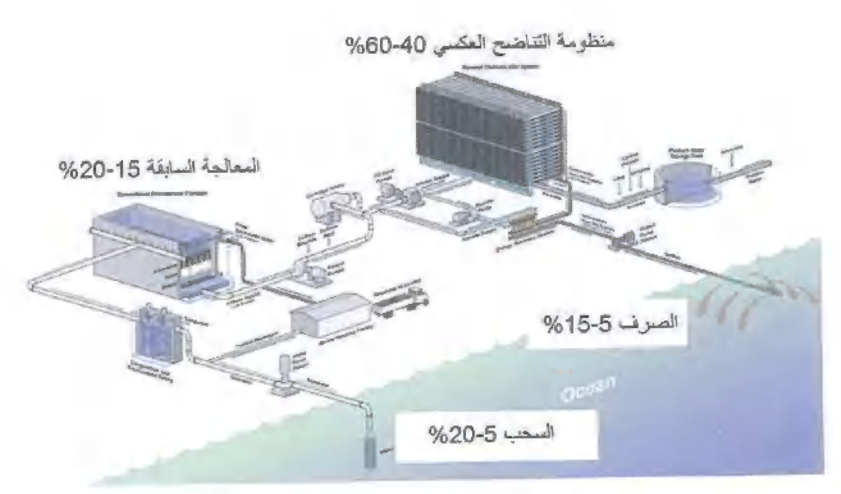
كوس/مP³P: كيلووات. ساعة لكل متر مكعب؛ P P ت ل م: تقطير لحظي متعدد؛ ت م ت: تقطير متعدد التأثير؛ ت ع م ب: تناضح عكسي لماء البحر؛ ت ع م م: تناضح عكسي لماء مسوس

* شاملة الدعم

** شاملة أنظمة استرجاع الطاقة



الشكل ٩١: تفصيل تكاليف إنشاء محطة تحلية بالتناضح العكسي. المصدر: Dietrich Consulting Group



الشكل ٩٢: تكاليف الإنشاء النسبية (% من مجمل تكاليف الإنشاء) للمكونات الرئيسية لمحطة تحلية لماء البحر بالتناضح العكسي. المصدر: Voutchkov (2011)

تمويل مشروعات التحلية وإدارتها

في السابق كان يجرى تمويل مشروعات التحلية الكبيرة وإدارتها باعتبارها مشروعات عامة حكومية. وكانت مهام القطاع الخاص (الوطني والأجنبي) تنحصر في إنشاء هذه المحطات وتسليمها إلى الجهات الحكومية المختصة جاهزة للتشغيل، وفقاً لما يعرف بعقود "التصميم، التوريد، والتشييد engineering, procurement, and construction."P١٢٤P54F مع الوقت دفع الحجم الكبير للاستثمارات المطلوبة لمشروعات التحلية. دفع حكومات كثيرة للاقتناع بضرورة إشراك القطاع الخاص في تمويل هذه المشروعات والاستفادة من إمكانيات هذا القطاع المتقدمة في مجالي الإدارة والتطوير التقني.P١٢٥P55F نتج عن هذا التوجه العالمي أنماط ومسميات مختلفة للشراكة بين القطاعين العام والخاص: مثل مشروعات "المنتجين المستقلين للمياه والكهرباء Independent Water and Power Producers (IWPP)" وعقود "شَيّد تملك شغل Build Own Operate (BOO)" و"شَيّد تملك شغل إنقل Build Own Operate Transfer (BOOT)".

تعتبر مشروعات المنتجين المستقلين "النسخة الخليجية" من مشروعات "شَيّد تملك شغل" أو "شَيّد تملك شغل إنقل"، وفيها يتعاقد "شريك " من القطاع العام مع "مطور" من القطاع الخاص (عادة شركة كبيرة أو اتحاد من مجموعة شركات) لتصميم وتنفيذ مشروع التحلية الكبير. يتولى الشريك "الخاص" في هذا النوع من التعاقدات مهام تصميم المشروع وتمويله وتشييده وتشغيله لفترة محددة من الوقت. أما الشريك "العام" فمهمته الأساسية هي توفير الضمانات الاقتصادية والقانونية للشريك الخاص، وقد يشارك جزئياً في التمويل. يحقق الشريك الخاص الربح من خلال "بيع" المنتج أو الخدمة إما مباشرة للمستهلك النهائي أو من خلال جهة حكومية مختصة. وبعد انتهاء الفترة المحددة في التعاقد (عادة ما تكون في حدود ٢٥ عاما) تنتقل ملكية المشروع في حالة عقود "شَيّد تملك شغل إنقل" إلى الجهة الحكومية المختصة أو الجهة الممولة للمشروع. تندرج كل هذه الأنواع من

[١٢٤] عقد "التصميم، التوريد، والتشييد" هو نوع من الاتفاقات التعاقدية المستخدمة في بعض الصناعات، والذي بموجبه تكون شركة المقاولات مسئولة عن التصميم الهندسي للمشروع، وتوريد المعدات والمواد اللازمة، وإنشاء المشروع وتسليمه جاهزا للتشغيل للمالك أو المستخدم النهائي.

[١٢٥] أنظر Ghaffour et al. (2013).

الاتفاقات التعاقدية تحت ما يسمى نماذج مشروعات الشراكة بين القطاع العام والخاص public-private partnership.

لنأخذ على سبيل المثال مشاريع المنتجين المستقلين بأبوظبي. لا يقوم *العميل client* (شركة الكهرباء والمياه المحلية) في هذه المشروعات بشراء المحطة وإنما المياه والكهرباء المنتجة. يتطلب هذا وجود طرف ثالث وسيط. يسمى *المطور developer* أو *الراعي sponsor*. يتولى إنشاء المحطة وتشغيلها وإدارتها بشكل "مستقل"، على أن يبيع المياه والكهرباء المنتجة للعميل الحكومي وفقاً لاتفاقية طويلة الأمد (نحو ٢٠ عاما).P١٢٦P56F ويكون المطور في العادة عبارة عن شركة جديدة تُنشأ خصيصاً لهذا الغرض، وتساهِم "هيئة مياه وكهرباء أبوظبي" مع صاحب العطاء الفائز في مناقصة التوريد في تكوين رأسمال الشركة المستقلة الجديدة.

يعود الاهتمام في منطقة الخليج بهذا النوع من المشاريع إلى أوائل تسعينات القرن الماضي، عندما طلبت حكومة البحرين من إحدى شركات الطاقة العالمية تقديم عرض لتكوين "مجمع ذي ملكية خاصة" لإنتاج الكهرباء والمياه (بقدرة يومية ٦٠٠ ميجاوات من الكهرباء و٣٠ مليون جالون بريطانيP١٢٧57F من المياه).P١٢٨P58F ورغم أن ذاك المشروع جرى تمويله وإدارته في النهاية بالطرق التقليدية المعتادة (تصميم، توريد، وإنشاء) إلا أن مفهوم مشروعات المنتجين المستقلين انتشر بعد ذلك بكثرة في منطقة الخليج. ففي ٢٠٠٤ أعلنت السعودية عن خطتها لاطلاق ١٠ من هذه المشروعات بحلول العام ٢٠١٦، بتكلفة إجمالية تبلغ ١٦ بليون دولارP١٢٩P59F وبحلول عام ٢٠٠٧ وصل عدد هذه المشروعات (مياه وكهرباء أو كهرباء فقط) في دول الشرق الأوسط إلى ٢٠ مشروعا.P١٣٠P60F ووفقاً لـ "مكتب التنظيم

---

[١٢٦] أنظر Ghiazza & Ferro (2007).

[١٢٧] ٣٠ مليون جالون بريطاني = ١٣٦٣٨٢.٧ متر مكعب

[١٢٨] أنظر Alawadhi (1999).

[١٢٩] أنظر SUSRIS.

[١٣٠] أنظر PennWell Corporation (2007-2016).

والرقابة" لإمارة أبوظبي تشكل مشروعات المنتجين المستقلين كل القدرات الإنتاجية لقطاع المياه والكهرباء في الإمارة منذ العام ٢٠١٣.P61F[١٣١]

تتواجد اليابان بقوة في مشاريع المنتجين المستقلين بمنطقة الخليج، من خلال مشاركة بيوت الخبرة اليابانية في تنفيذ العديد من تلك المشاريع ومساهمة "بنك اليابان للتعاون الدولي Japan Bank for International Co-operation" في تمويل المشاريع التي تقوم بتنفيذها الشركات اليابانية (مثل محطة الطويلة ب ومحطة الفجيرة ٢ في الإمارات).P62F[١٣٢]

يجرى في الوقت الحالي تمويل وتشغيل أغلب مشروعات التحلية الحديثة من قبل القطاع الخاص وفقاً لأحد النماذج السابقة (على سبيل المثال، مشروع محطة الزور الشمالية في الكويت، بقدرة ١ ٥٣٩ ميجاوات من الكهرباء و١٠٧ مليون جالون من الماء يوميا).P63F[١٣٣] P

---

[١٣١] أنظر RSB.

[١٣٢] أنظر PennWell Corporation (2007-2016).

[١٣٣] أنظر Ghaffour et al. (2013).

٨. التحلية بمصادر الطاقة المستدامة

أدت التكاليف المرتفعة للوقود الأحفوري، الاستهلاك المتزايد لمصادره، وآثاره البيئية السلبية إلى زيادة الاهتمام باستخدام مصادر الطاقة المتجددة والبديلة (شاملة الطاقة النووية) في عمليات التحلية.

التحلية المتجددة

التحلية المعتمدة على مصادر *الطاقة المتجددة renewable energy*، أو ما يسمى اختصاراً *التحلية المتجددة renewable desalination*، قد يمكنها أن تقدم طريقة مستدامة لإنتاج المياه العذبة. يبين جدول ١٤ مصادر الطاقة المتجددة التي تناسب تقنيات التحلية المختلفة.

مازالت تكلفة التحلية المتجددة بشكل عام أعلى مقارنة مع تكلفة التحلية التقليدية التي تعتمد على الوقود الأحفوري كمصدر للطاقة (جدول ١٥). لكن تكاليف التقنيات المتجددة آخذة في الانخفاض سريعا. وقد أصبحت التحلية المتجددة تنافس الأنظمة التقليدية في المناطق النائية حيث تكون تكاليف نقل وتوزيع الطاقة أعلى من تكلفة توليدها. إن الاستخدام الحالي الضئيل للتحلية المتجددة (أقل من ١% من سعة التحلية العالمية المعتمدة على الوقود الأحفوري)P١٣٤P64F لا يعكس المزايا التي يمكن أن توفرها هذه التقنيات.

[١٣٤] أنظر EU (2008).

جدول ١٤: أنواع الطاقة المتجددة المناسبة لتقنيات التحلية الرئيسية. المصدر: Al-Karaghouli (2011)

التقنية	ت ل م	ت م ت	ت ض ب	ت ع	ف ك
شمسية حرارية			✓	✓	✓
ضوء. جهدية			✓	✓	✓
رياح	✓	✓	✓	✓	✓
أرض. حرارية	✓	✓	✓	✓	✓

تلم: تقطير لحظي متعدد؛ تمت: تقطير متعدد التأثير؛ تضب: تقطير بضغط البخار؛ تع: تناضح عكسي؛ فك: فصل كهربي

تعتمد التحلية المتجددة أساساً على عمليات التناضح العكسي (٦٢%)، يليها العمليات الحرارية مثل التقطير اللحظي والتقطير متعدد التأثير.P65F[١٣٥] Pالطاقة *الضوء.جهدية* (أو *الكهروضوئية*) *photovoltaic* هي السائدة في التحلية المتجددة، وهي مستخدمة في ٤٣% من التطبيقات الموجودة حاليا، يليها *الشمسية الحرارية* *solar thermal* وطاقة الرياح wind energy.P66F[١٣٦]

التحلية الشمسية الحرارية

تتكون محطة التحلية الشمسية الحرارية من جزأين: مجمع (أو *ملتقط*) *حرارة شمسية* *solar heat collector* و*مقطر* *distiller*، ويشار لعملية التحلية الشمسية الحرارية على إنها غير

---

[١٣٥] أنظر Isaka (2012).

[١٣٦] أنظر EU (2008). نلاحظ أن مشاريع التحلية المتجددة بطاقة الرياح تتركز في الدول الأوربية.

مباشرة إذا أتت الحرارة من مجمع شمسي منفصل عن وحدة التحلية، وعلى إنها مباشرة إذا كانت جميع المكونات مدمجة معاً في وحدة كاملة.P67F[١٣٧]

جدول ١٥: تكلفة إنتاج المياه المحلاة حسب مصدر الطاقة المستخدمة. المصدر: مستقاة من (2008) Karagiannis & Soldatros

مصدر مياه التغذية	مصدر الطاقة	التكلفة (€/مP³P)
	تقليدية	١.٠٦ . ٠.٢١
ماء مسوس	ضوء. جهدية	١٠.٣٢ . ٤.٥٠
	أرض. حرارية	٢.٠٠
	تقليدية	٢.٧٠ . ٠.٣٥
ماء بحر	رياح	٥.٠٠ . ١.٠٠
	ضوء. جهدية	٩.٠٠ . ٣.١٤

تعمل محطات *الكهرباء الشمسية المتركزة concentrating solar power* على تجميع الأشعة الشمسية وتوفر الحرارة العالية المطلوبة لتوليد الكهرباء. ومن ثم يمكن الجمع بينها وبين وحدات التحلية التي تحتاج لطاقة كهربية (مثل التناضح العكسي) أو استخدامها في وحدات التحلية الحرارية. عادة ما يتم تجهيز محطات الكهرباء الشمسية بأنظمة تخزين للطاقة بحيث يمكن الاعتماد عليها عندما لا تتوفر الأشعة الشمسية، وقد يجرى ربطها بمحطات الكهرباء التقليدية من أجل *تشغيل هجين أو مختلط hyprid operation*. تستطيع المحطات الشمسية الكبيرة توفير الطاقة الأساسية لمحطات التحلية ذات القدرات المتوسطة إلى الكبيرة، وتعتبر هذه المحطات تقنية متعددة الأغراض واعدة، إذ يمكن استخدامها في توليد الكهرباء، التدفئة أو التبريد، وتحلية المياه المالحة.

---

[١٣٧] أنظر (2005) Kalogirou.

الجدير بالذكر أن التقطير متعدد التأثير قد يكون أكفأ استخداماً للكهرباء الشمسية من التناضح العكسي في منطقة الخليج بسبب ارتفاع ملوحة ماء الخليج العربي.P68F[١٣٨]

التحلية الضوء. جهدية

يمكن استخدام التقنية الضوء. *جهدية* (الخلايا الشمسية) مباشرة مع عمليات التحلية بالأغشية (التناضح العكسي والفصل الكهربي)، فهي تعتمد على الكهرباء الناتجة من ضوء الشمس كمصدر طاقة. يوجد الكثير من أنظمة التحلية الضوء. جهدية التوضيحية الصغيرة بمختلف أرجاء العالم، خاصة في المناطق النائية والجزر. وفيما يلي بعض الأمثلة:P69F[١٣٩]

- "كناريا الكبرى Gran Canaria"، "جزر الكناري Canary Islands" الأسبانية: تناضح عكسي لماء البحر، ١ - ٥ م^{٣}/يوم؛
- الرياض، السعودية: تناضح عكسي للماء المسوس، ٥ م^{٣}/يوم؛
- و"جزيرة أوهشيما Ohshima Island"، اليابان: فصل كهربي لماء البحر، ١٠ م^{٣}/يوم.

في ٢٦ يناير ٢٠١٥ أعلنت "أبنچوا /aβeŋ' goa/ 40T Abengoa" الأسبانية أنها ستبني، في شراكة مع "تكنولوجيا المياه الحديثة" السعودية، أكبر محطة تحلية بالطاقة الضوء. جهدية في مدينة الخفجي بشمال شرق السعودية.P70F[١٤٠] يتكلف بناء هذه المحطة ١٣٠ مليون دولار، وستنتج ٦٠٠٠٠ مP[٣]P/يوم بتقنية التناضح العكسي لماء البحر، وسيعقبها أربع مراحل اضافية جديدة لتصل انتاجيتها إلي ٣٠٠ ألف متر مكعب يومياً (الشكل ٩٣).P71F[١٤١] يتوقع أن يكتمل بناء هذه المحطة في عام ٢٠١٧.P72F[١٤٢]

---

[١٣٨] أنظر DLR (2007).

[١٣٩] أنظر Kalogirou (2005).

[١٤٠] نستخدم الرمز "چ" بدلا من حرف الجيم المعتاد (ج) في كتابة الكلمات الأجنبية بأحرف عربية للدلالة على أنه ينطق مثل الجيم المصرية (جيم غير معطشة). وتشير الرموز المكتوبة بالأزرق بين مائلتين، /.../، إلى *الرموز الصوتية الدولية International Phonetic Symbols (IPS)*، وهي رموز موحدة متفق عليها دوليا للتعبير عن نطق أي كلمة مكتوبة بغض النظر عن اللغة المأخوذة منها الكلمة.

[١٤١] أنظر Egypt Oil&Gas Web Portal (2015). الجدير بالذكر أن مشروعات التحلية تنشأ عادة على بضعة مراحل.

[١٤٢] أنظر Parkinson (2015). لم نستطع أن نعرف هل تم فعلا الانتهاء من هذا المشروع أم أن هناك تعديل.

يكمن التحدي الرئيسي للتحلية الضوء. جهدية في التكلفة العالية للخلايا الضوء. جهدية وبطاريات تخزين الكهرباء،P[١٤٣]P73F علاوة على ضرورة التشغيل الدقيق والصيانة المستمرة لأنظمة البطاريات. ومن المتوقع أن تؤدي التحسينات الفنية في أجهزة تخزين الكهرباء إلى استخدام أوسع للتحلية الضوء. جهدية.

التحلية بقدرة الرياح

يمكن استخدام القدرة الكهربية والميكانيكية المولدة من توربينات الرياح في تشغيل محطات التحلية، لاسيما وحدات التحلية بالتناضح العكسي، الفصل الكهربائي، والتقطير بضغط البخار. ويمكن استخدام الطاقة الميكانيكية لتوربينات الرياح مباشرة (دون تحويلها إلى كهرباء) في طريقة التقطير بضغط البخار ميكانيكيا. تعتبر التحلية المعتمدة على قدرة الرياح إحدى الخيارات الواعدة لتحلية ماء البحر، خاصة في المناطق الساحلية حيث تكثر الرياح القوية. يتواجد العديد من محطات التحلية المعتمدة على قدرة الرياح في أماكن مختلفة من العالم:P[١٤٤]P74F



الشكل ٩٣: محطة الخفجي لتحلية ماء البحر.

---

[١٤٣] لقد انخفضت كثيرا تكلفة الخلايا الضوء ـ جهدية في السنين القليلة الماضية، ويتم الاستعانة بأجهزة لتخزين الطاقة الكهربائية (مثل البطاريات) لاستخدامها عند غياب الأشعة الشمسية في حالة الرغبة في تشغيل المحطة ٢٤ ساعة في اليوم.

[١٤٤] أنظر المرجع السابق و(2009) .Al-Karaghouli et al.

- "كناريا الكبرى Gran Canaria"، "جزر الكناري Canary Islands" الأسبانية (الشكل ٩٤):P[١٤٥]P75F تناضح عكسي لماء البحر، ٥ - ٥٠ م[٣]/يوم؛
- "جزيرة فورتبنتورا Fuerteventura Island"، جزر الكناري Canary Islands الأسبانية: تناضح عكسي لماء البحر (هجين رياح - ديزل)، ٥٦ م[٣]P[٣]/يوم؛
- و"مركز تكنولوجيا أنظمة الطاقة المتجددة Centre for Renewable Energy Systems Technology" بالمملكة المتحدة، تناضح عكسي لماء البحر، ١٢ م[٣]P[٣]/يوم.

وكما هو الحال في التقنيات الضوء- جهدية والكهرباء الشمسية المتمركزة، فإن تقطع مصدر الطاقة هو أحد عيوب التحلية بقدرة الرياح. يمكن التقليل من هذه المشكلة بربط طاقة الرياح بأنواع أخرى من الطاقة المتجددة أو بالبطاريات (وأنظمة تخزين الطاقة الأخرى). وتعتبر تحلية المياه في حد ذاتها طريقة ممتازة لتخزين الطاقة في حالة زيادة إنتاج الكهرباء عن الطلب عليها (تستخدم الكهرباء الزائدة في تحلية كميات إضافية من المياه يتم تخزينها لتوزع عند الاحتياج إليها).P76F[١٤٦]

تستمد *محطة بيرث لتحلية مياه البحر Perth Seawater Desalination Plant* في جنوب غرب أستراليا. وهي واحدة من كبرى محطات التناضح العكسي (بسعة تبلغ ١٤٤ ألف متر مكعب يوميا). تستمد جزءاً من الطاقة التي تحتاجها من قدرة الرياح.[١٤٧]

[١٤٥] جزر الكناري هي أرخبيل يقع في المحيط الأطلسي على بعد ١٠٠ مترا إلى الغرب من الحدود المغربية الجنوبية. يتميز هذا الأرخبيل بصيف طويل حار وشتاء دافئ معتدل. تتباين مستويات الأمطار كثيرا على جزر هذا الأرخبيل تبعا للموقع والارتفاع، ولذلك تحتوي على مناطق خضراء وأخرى صحراء. مناخ هذا الأرخبيل وشواطئه وتضاريسة الفريدة المتنوعة جعلت منه مزارا سياحيا رائجا (مفضلا لأثرياء شمال أوروبا) يجذب أكثر من ١٢ مليون زائر سنويا، يتجه معظمهم إلى الجزيرة الأكبر "تناريف Tenerife".

[١٤٦] أنظر Gude et al. (2010).

[١٤٧] تعمل محطة بيرث منذ العام ٢٠٠٦، وهي تستمد جزءا من الطاقة التي تحتاجها من مزرعة رياح "امو داونز Emu Downs Wind Farm".

التحلية الأرض. حرارية

تستطيع الطاقة الأرض. حرارية (الناجمة عن حرارة الأرض الداخلية، الشكل ٩٥) إنتاج الحرارة والكهرباء، لذلك يمكن استخدامها مع التحلية الحرارية والتحلية بالأغشية. كما تناسب الطاقة الأرض. حرارية منخفضة الدرجة (٧٠ - ٩٠°س) التحلية بالتقطير متعدد التأثير.



الشكل ٩٤: واحدة من مزارع الرياح المنتشرة في جزر الكناري الأسبانية.

يتوقف استغلال الطاقة الأرض - الحرارية كثيراً على الظروف المحلية، كما أنه يتطلب في العادة *تكاليف استثمارية مبدئية upfront investment costs* عالية.

من الأمثلة المتداولة على استخدام الطاقة الأرض. حرارية في التحلية المحطة الموجودة في جزيرة "ميلوس Milos" اليونانية (الشكل ٩٦). وهي محطة تستخدم المياه الساخنة من بئر أرض. حراري لتوليد الكهرباء أو تحلية المياه (محطة مزدوجة الغرض). تستخدم هذه المحطة طريقة التقطير متعدد التأثير، وتبلغ قدرتها ١٩٢٠ م^{٣}/يوم[١٤٨] كان الهدف الرئيسي

[١٤٨] أنظر Iskas (2012).

من هذا المشروع الإيضاحي المبتكر هو توفير مياه الشرب للمجتمع المحلي بتكلفة مقبولة نسبياً (٢.٠$ /م٣) مع استخدام كفء للطاقة للحد من الآثار البيئية السلبية.P79F[١٤٩]



الشكل ٩٥: الطاقة الأرض. حرارية من المعالم السياحية الشهيرة في إيسلندا "الباردة".

التحلية والطاقة النووية

جرى تجربة استخدام الطاقة النووية في تحلية ماء البحر منذ عشرات السنين، مع أكثر من ٢٠٠ "مفاعل. سنة" من الخبرة التشغيلية بأنحاء مختلفة من العالم،P[١٥٠]P80F منها أكثر من ١٧٠ مفاعل - سنة في اليابان وحدها.P81F[١٥١]

---

[١٤٩] أنظر CORDIS (2003).

[١٥٠] الخبرة التشغيلية العالمية للمفاعلات النووية = مجموع حواصل ضرب كل مفاعل في سنوات تشغيله.

[١٥١] أنظر Khamis & Tewari (2007).

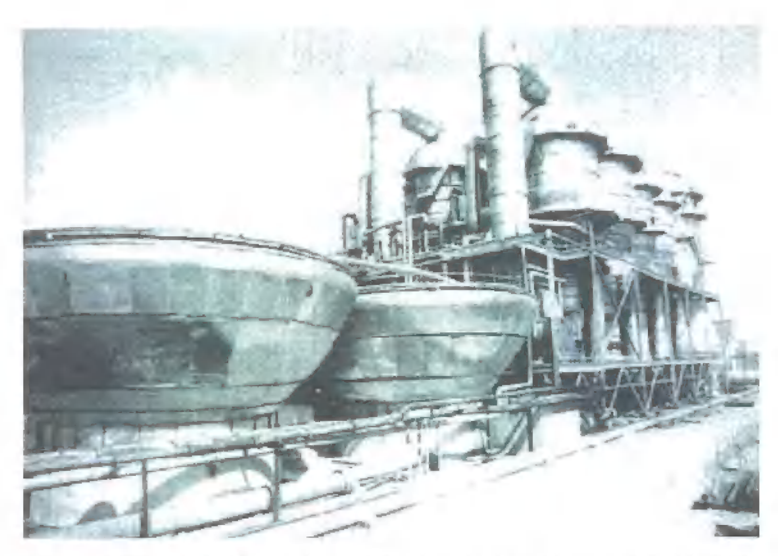


الشكل ٩٦: المياه الأرضية الساخنة في جزيرة "ميلوس" اليونانية.

المثال الأقدم على *التحلية النووية nuclear desalination* هو وحدة التحلية الحرارية التي عملت في محطة "أكتاو Aktau" النووية (كازاخستان) في الفترة من ١٩٧٣ إلى ١٩٩٩ (الشكل ٩٧).P[١٥٢]P82F اسـتَخدمت تلك المحطة مفاعلاً نووياً سوفيتياً من النوع "BN-350"، وهو *مفاعل سريع مُبرد بالصوديوم sodium-cooled fast reactor*. بدأ إنشاء المفاعل في ١٩٦٤، وبدأت المحطة في إنتاج الكهرباء في ١٩٧٣ (بإنتاج وصل إلى ١٢٥ ميجاوات).P[١٥٣]P83F تعتبر محطة أكتاو شكلاً مبكراً للمحطات النووية متعددة الأغراض؛ فبالإضافة لتوليد الكهرباء أُستخدمت تلك المحطة في إنتاج البلوتونيوم plutonium وتحلية المياه (بالتقطير اللحظي والتقطير متعدد التأثير، وبسعة ٨٠٠٠٠ م P[٣]/يوم).

[١٥٢] الاسم السابق لمدينة "أكتاو Aktau" هو "شفتشنكو Shevchenko".

[١٥٣] أنظر سامر مخيمر وخالد حجازي (١٩٩٦: ١٦٦).



الشكل ٩٧: وحدة التحلية الحرارية في مفاعل "أكتاو" بكازاخستان.

حديثا، أنشأت كل من الهند وباكستان مشروعات توضيحية للتحلية في مفاعلاتها النووية القائمة (وهي من نوع *مفاعلات الماء الثقيل المضغوط pressurised heavy water reactors*). ويظهر الشكل ٩٨ محطة التحلية النووية في بلدة "كالپكام Kalpakkam" الهندية.



الشكل ٩٨: محطة التحلية (تقطير لحظي مع تناضح عكسي) في "كالپاكام" بالهند.

لقد أطلقت روسيا مؤخراً مشروعاً لتشييد منشأة للإنتاج المشترك (كهرباء ومياه) في مدينة "سڤرودڤينسك Severodvinsk" تعتمد على *المفاعلات النووية الطافية* (محمولة على بارجة) (الشكل ٩٩). قد يكون هذا النوع من المحطات مفيداً بصفة خاصة في الاستجابة السريعة للطلبات الطارئة على المياه الصالحة للشرب.

تشير دراسات الجدوى الاقتصادية إلى أن تكاليف المياه المنتجة من التحلية النووية لماء البحر تقع بشكل عام في نفس المدى الخاص بالتحلية التقليدية (المعتمدة على الوقود الأحفوري) . إن لم تكن أقل، رغم أن التكلفة الاستثمارية لمحطات التحلية النووية هي عامة أعلى.P84F[١٠٤]



الشكل ٩٩: رسم تصويري لمجمع الطاقة والتحلية النووي المزمع إنشائه في مدينة "سڤرودڤينسك" (روسيا).

الجدير بالذكر أن أغلب الدول التي تعاني من ندرة المياه لا تمتلك التنكولوجيا النووية، ليس لديها محطات نووية، ولا يتوفر لديها البنية التحتية اللازمة للاستفادة من الطاقة النووية. لقد أبدت الكثير من الدول النامية اهتماماً واضحاً بتكنولوجيا الطاقة النووية. في المقابل لا تثق

---

[١٠٤] أنظر (Misra & Khamis (2014: 109 & 110.

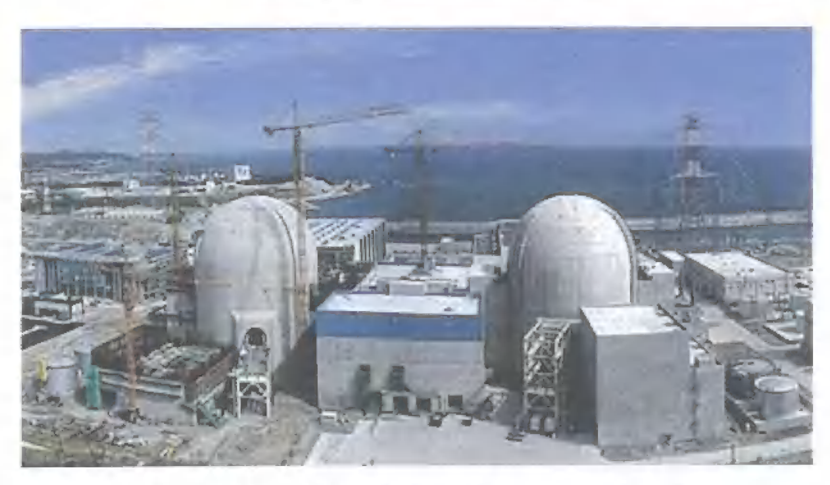
الدول الصناعية الكبرى التي تمتلك التكنولوجيا النووية في النوايا الحقيقية، الاستقرار السياسي، القدرات المالية، أو المؤسسات الرقابية بمعظم هذه الدول النامية. على كل حال سوف يكون من الأفضل للطرفين أن تعمل الدول النامية على توفير البنية التحتية المناسبة وتطوير مؤسساتها الرقابية والمالية إذا ما أرادت فعلاً الاستفادة الآمنة من التكنولوجيا النووية، وفوق كل ذلك نشر "ثقافة الأمان safety culture" بين مواطنيها وفي مؤسساتها الوطنية.

تعد مصر أول دولة عربية اهتمت بوضع برنامج وطني للطاقة النووية، حيث بدأت الإعداد لهذا البرنامج في منتصف القرن المنصرم. سرعان ما توقف هذا البرنامج في سبعينات نفس القرن لأسباب فنية واقتصادية. كانت مصر تنوي تشييد محطة نووية لتوليد الكهرباء في ثمانينات القرن العشرين. وفي ٢٠٠٧ أعلنت القاهرة مجدداً عن تخطيطها لإقامة عدة مفاعلات نووية لمواجهة احتياجاتها المتنامية للطاقة. وقد عرضت كل من الصين، فرنسا، روسيا، وكازاخستان التعاون مع مصر في هذا القطاع. وقد تعاقدت الحكومة المصرية في يونيو ٢٠١٠ مع شركة Worley Parsons الأسترالية الاستشارية لإدارة ذاك المشروع. كان المخطط أن يُجرى تحديث لكل الدراسات، بما في ذلك دراسة اختيار المواقع المقترحة، إعداد الوثائق الضرورية لاستدراج عروض بناء المحطة النووية الأولى، وتجهيز ما يلزم من بنى تحتية تشريعية وصناعية. لكن المشروع عاد وتأجل مرة أخرى بسبب الأحداث السياسية الأخيرة.P[١٠٠]P85F أخيراً وقعت الحكومة المصرية مع روسيا الاتحادية في فبراير ٢٠١٥ مذكرة تفاهم لإنشاء أول محطة للكهرباء النووية في مصر، بتكلفة مقدارها ١٠ مليار (بليون) دولار أمريكي.

تمتلك دولة الإمارات العربية برنامجاً نووياً سلمياً هو الأكثر تقدماً بالنسبة للدول العربية في الوقت الحالي. وبعد تشغيل المفاعل الأول (من إجمالي أربعة مفاعلات) في "محطة براكة النووية" في مطلع ٢٠١٧ تكون الإمارات هي أول دولة عربية تنتج الكهرباء باستخدام تكنولوجيا الطاقة النووية (الشكل ١٠٠). يقوم بتنفيذ هذا المشروع مجموعة من الشركات العالمية بقيادة شركة "كيكو KEPCO" الكورية الجنوبية. لقد تجاوزت القيمة التعاقدية لهذا

[١٠٠] أنظر حسن الشريف (٢٠١١).

المشروع الـ ٢٠ بليون دولار، وهو يتضمن بناء وتشغيل أربعة مفاعلات نووية قدرة كل منها ١٥٠٠ ميجاوات. بُدأ العمل في بناء المفاعل الأول سنة ٢٠١٢، والمخطط أن يكتمل بناء وتشغيل جميع المفاعلات وربطها بالشبكة الكهربائية بحلول ٢٠٢٠.P86F[١٥٦]



الشكل ١٠٠: محطة براكة النووية (غرب أبوظبي).

في بدايات ٢٠٠٩ أشارت تقارير إعلامية أن المملكة العربية السعودية وفرنسا كانتا على وشك التوصل إلى اتفاقية تعاون في مجال الطاقة النووية. كما أبدت كل من الولايات المتحدة وروسيا الاهتمام بمساعدة السعودية في تطوير برنامج مدني للطاقة النووية. وفي مارس ٢٠١٥ وقعت السعودية مذكرة تفاهم مع كوريا الجنوبية بشأن التعاون في تطوير الطاقة النووية بالمملكة. تتضمن هذه المذكرة دعوة الشركات الكورية الجنوبية إلى المشاركة في تشييد مفاعلين نوويين (أو أكثر) من الحجم الكبير أو المتوسط في السعودية. يتوقع أن تبلغ تكلفة إنشاء ذانك المفاعلين نحو ملياري دولار أمريكي.P87F[١٥٧]

تجدر الإشارة هنا أن دول شمال أفريقيا الخمسة (مصر، ليبيا، تونس، الجزائر، والمغرب) كانت قد طلبت في بداية تسعينات القرن الماضي من "الوكالة الدولية للطاقة الذرية International Atomic Energy Agency (IAEA)" المساعدة في إجراء دراسة عن الجدوى

[١٥٦] المرجع السابق

[١٥٧] أنظر فرانس٢٤/رويترز (٢٠١٥).

التقنية والاقتصادية لاستخدام الطاقة النووية في تحلية مياه البحر بهذه الدول. أجريت تلك الدراسة في الفترة من ١٩٩١ - ١٩٩٤ على خمسة مواقع مختارة (واحد في كل بلد) على أساس احتياجاتها التقديرية من المياه المحلاة في العام ٢٠٠٥.

تقع جميع المواقع المختارة على البحر مباشرة، وهي كالتالي:

- الضبعة (مصر): ٢٤٠٠٠٠ م٣P٣/يوم؛
- طرابلس (ليبيا): ٧٢٠٠٠٠ م٣P٣/يوم؛
- جرجيس (تونس): ٦٠٠٠٠ م٣P٣/يوم؛
- وهران (الجزائر): ١٢٠٠٠٠ م٣P٣/يوم؛
- والعيون (المغرب): ٢٤٠٠٠ م٣P٣/يوم.

نُشرت نتائج تلك الدراسة في تقرير للوكالة الدولية للطاقة الذرية صدر في ١٩٩٦.P١٥٨P88F وفيما يلي ملخص لأهم ما جاء بهذا التقرير المكتوب بلغة دبلوماسية حذرة.

- قدرت تلك الدراسة أن عجز المياه في منطقة شمال إفريقيا يمكن أن يصل بحلول ٢٠٢٥ إلى ٤٠ مليون متر مكعب يوميا.
- تتقارب تكلفة التحلية باستخدام الوقود النووي مع تكلفتها باستخدام الوقود الأحفوري؛ إذ تراوحت تكلفة المتر المكعب من المياه المحلاة من ٠.٧٠ . ١.٠٠ دولار بالنسبة للأحفوري، ومن ٠.٧٣ . ٠.٩١ دولار للنووي، وفقاً لحجم المحطة.
- سيكون من الصعب تمويل المشروعات النووية في دول شمال إفريقيا من مصادر دولية، وسيكون على هذه الدول الاعتماد على مواردها الذاتية.
- تستطيع دول شمال إفريقيا الحصول على التكنولوجيا النووية، المفاعلات النووية، والوقود والمواد والمعدات النووية من الموردين الأجانب. فقط إذا استطاعت توفير دليل كاف على استخدامها حصرياً في الأغراض السلمية.

---

[١٥٨] أنظر IAEA (1996).

- يعد استخدام الطاقة النووية في دول شمال إفريقيا لتوليد الكهرباء وتحلية ماء البحر . يعد ممكناً من الناحية التقنية ومنافساً من الناحية الاقتصادية، وذلك للوحدات المتوسطة إلى الكبيرة المدمجة في أنظمة شبكات الكهرباء بهذه الدول.
- فيما يتعلق بالجدوى الفنية لا توجد موانع لاستخدام المفاعلات النووية في توفير الطاقة لمحطات التحلية. ومع ذلك، ونتيجة لطبيعة الطاقة النووية الخاصة، هناك "أمور مؤسساتية" يجب حلها لضمان التنفيذ المناسب للمشروعات وفي النهاية التشغيل الآمن والفعال للمحطة النووية.

وقد قامت السعودية في ذاك الوقت تقريباً بإجراء دراسة مماثلة لمنطقة الخليج العربي بالاستعانة أيضاً بالوكالة الدولية،P[١٥٩]P89F ولكن وكما هو معروف لم تُستخدم الطاقة النووية على نطاق صناعي في أي من الدول العربية حتى الآن (نوفمبر ٢٠١٧).

[١٥٩] أنظر سامر مخيمر وخالد حجازي (١٩٩٦: ١٦٦).

٩. التحلية في العالم العربي

تعاني المنطقة العربية من نقص حاد في المصادر الطبيعية للمياه العذبة، مما يشكل قيداً خطيراً على التنمية الاقتصادية، الاجتماعية، والبشرية. وتعتبر تحلية مياه البحر من أهم التقنيات المتاحة لمواجهة مشكلة ندرة المياه العذبة. تتمثل هذه الأهمية في كون ماء البحر يبدو مصدراً غير محدود لتوفير المياه العذبة دون الإضرار بالأنظمة البيئية للمصادر الطبيعية (الأنهار والمياه الجوفية).

تعتمد دول مجلس التعاون الخليجي على التحلية كثيرا، إذ توفر التحلية منذ العام ٢٠١٠ أكثر من ٧٥% من الطلب الإجمالي على المياه في أربع دول خليجية: البحرين، الكويت، قطر، والإمارات (الشكل ١٠١).P[١٦٠]P91F في المقابل لازال الاعتماد على التحلية في دول المغرب العربي ضئيلا؛ إذ لا تساهم التحلية في الدولتين الأكثر استخداماً لها في هذه المنطقة، أي الجزائر وليبيا، سوى بأقل من ٥% من إجمالي الموارد المائية.

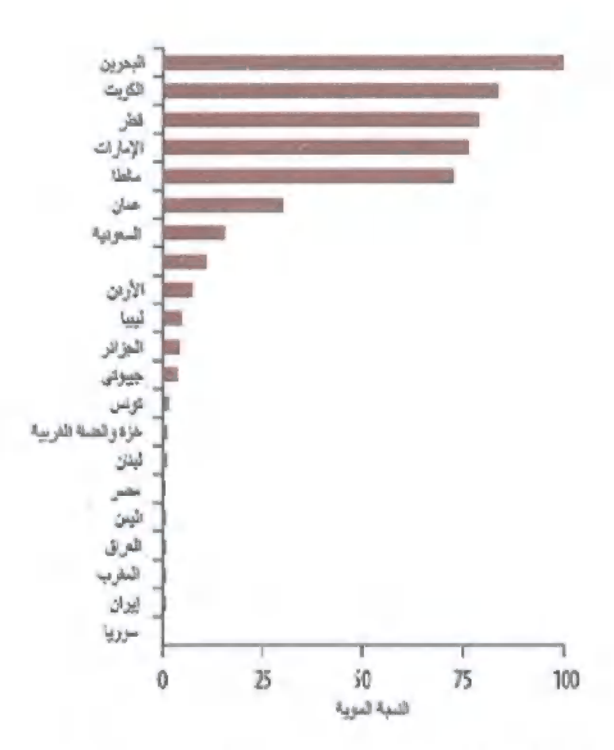
تتصدر المنطقة العربية، خاصة دول الخليج العربي، العالم في مجال التحلية. تحتل المملكة العربية السعودية ودولة الإمارات العربية المتحدة المرتبتين الأولى والثانية في قائمة كبار منتجي المياه المحلاة بالعالم (الشكل ١٠٢). وتنتج خمس دول عربية (السعودية، الأمارات، الجزائر، قطر، والكويت) أكثر من ٥٠% من السعة العالمية للتحلية.P90F[١٦١] تم تشييد أول محطة تحلية صناعية بالعالم في الكويت منتصف خمسينات القرن الماضي كما عرفنا سابقاً. وتحوي المنطقة العربية كبريات محطات التحلية وأحدثها بالعالم (الشكل ١٠٣).

الجدير بالذكر أن إنتاج أكثر من ٨٠% من المياه المحلاة في منطقة الخليج يجرى باستخدام تقنية التقطير الحراري (بطريقتي التقطير اللحظي متعدد المراحل والتقطير متعدد التأثير).

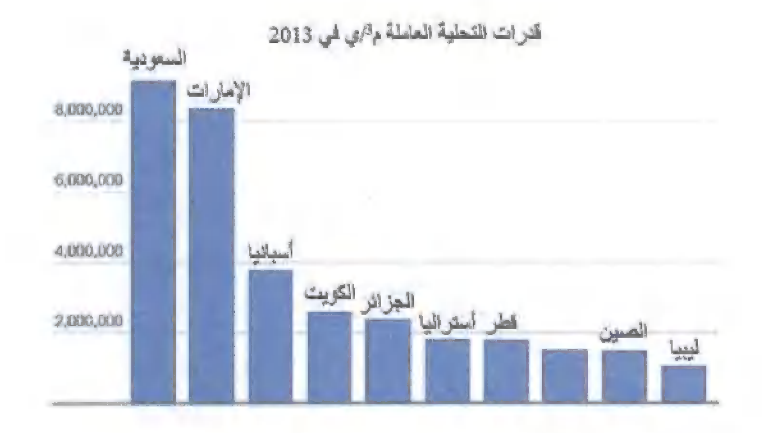
---

[١٦٠] تصل نسبة الاعتماد على مياه التحلية إلى ١٠٠% في كل من البحرين، الكويت، وقطر بالنسبة للإمدادات المنزلية والصناعية (Arras et al. 2009).

[١٦١] أنظر Kucera (2014: 24).



الشكل ١٠١: إسهام التحلية في الطلب على المياه في دول الشاشا (٢٠١٠). المصدر: World Bank (2012)



الشكل ١٠٢: أكبر منتجي المياه المحلاة في العالم.
المصدر: ChinaDialogue.net (2015)

جدول ١٦: كبريات محطات التحلية في العالم.[١٦٣] المصدر: Clayton (2015)

المحطة	التقنية المستعملة	السعة (م³/يوم)	عام التشغيل
رأس الخير، السعودية	ت ع + ت ل م	١٠٢٥٠٠٠	٢٠١٣
الشبيعة، السعودية	ت ل م	٨٨٠٠٠٠	٢٠٠٧
جبل علي، الإمارات	ت ل م	٦٠٠٠٠٠	٢٠١١
الزور الشمالية، الكويت	ت م ت	٥٦٧٠٠٠	٢٠٠٧
المقطع، الجزائر	ت ع	٥٠٠٠٠٠	٢٠٠٩

ت ع: تناضح عكسي؛ ت ل م: تقطير لحظي متعدد؛ ت م ت: تقطير متعدد التأثير

---

[١٦٣] يوجد الآن بدولة الإمارات محطات تحلية ذات سعات أكبر، مثل محطة الطويلة التي تنتج ١,٣ مليون متر مكعب يوميا (محكم الكتاب).



الشكل ١٠٣: مخطط محطة تحلية رأس الخير بالسعودية.

سنستعرض في الجزء التالي مقتطفات من أوضاع التحلية وأنشطتها في بعض الدول الخليجية:

لقد بلغ إنتاج السعودية من المياه المحلاة في ٢٠١٥ نحو ١١٠٧.٦ مليون متر مكعب (٥٥٠.١ مليون متر مكعب من محطات الساحل الشرقي بنسبة ٤٩.٧%، و٥٥٧.٥ مليون متر مكعب من محطات الساحل الغربي بنسبة ٥٠.٣%). وتخطط السعودية للوصول بإنتاجها من المياه المحلاة إلى ٨ مليون متر مكعب يومياً بحلول العام ٢٠٣٠.

للإمارات وعمان تجارب رائدة في الاستفادة من مصادر الطاقة المتجددة في تحلية المياه.

تعود تجارب التحلية المتجددة في دولة الإمارات إلى العام ١٩٨٤ حين أقامت إمارة أبوظبي وحدة تجريبية صغيرة (٨٠ م٣/يوم) تعمل بالتقطير متعدد التأثير وتستخدم الطاقة الشمسية (الشكل ١٠٤). وقد ظلت هذه الوحدة تعمل حتى العام ٢٠٠٢.

وحديثاً يقود معهد مصدر في دولة الامارات عدداً من المشاريع البحثية المبتكرة والواعدة في مجال المياه. تهدف هذه المشروعات إلى إحداث نقلة نوعية على صعيد التقنيات التي تعتمد عليها دولة الإمارات في توفير مقدار كبير من حاجتها من المياه العذبة، سعياً وراء تعزيز الأمن المائي والحد من استنزاف موارد المياه العذبة الطبيعية المحدودة في الدولة، فضلاً عن تقديم

حلول تسهم في خفض التكلفة والحفاظ على البيئة. ففي عام ٢٠١٥ تم الإعلان عن بدء تشغيل أربع محطات تجريبية تعمل بالطاقة الشمسية، في منطقة غنتوت على مشارف العاصمة (الشكل ١٠٥). ينتج هذا المشروع ١٥٠٠ متراً مكعباً من المياه المحلاة يوميا، تصب جميعها في شبكة مياه أبوظبي.

تعتمد البحرين على أربع محطات تحلية رئيسية لتوفير مياه الشرب لأهلها المشهورين بالطيبة والكرم وزائريها الكثر. وقد زادت السعات الإنتاجية لهذه المحطات عدة مرات خلال العقود الماضية. فيما يلي وصف موجز لهذه المحطات:

- "شركة الحد للطاقة" - هي أكبر محطة في البحرين (٤٠٩٠٠٠ م³/يوم)، تستخدم طريقة التقطير اللحظي، وتقع جنوب جزيرة المحرق بالقرب من العاصمة المنامة.
- "محطة ستره لإنتاج الكهرباء والماء" - هي أقدم محطة في البلاد (بدأت الإنتاج في حقبة السبيعينات من القرن الماضي)، وتنتج ١١٤٠٠٠ م³/يوم من المياه المقطرة التي تخلط بالمياه الجوفية قبل دخولها على شبكة الإمداد الرئيسية.
- "محطة رأس أبو جرجور والدور لإنتاج المياه" - تنتج ٧٣٠٠٠ م³/يوم من المياه الجوفية المحلاة، وتقع على الساحل الشرقي لمملكة البحرين.
- "شركة ألبا" - هي مصنع كبير لإنتاج الألومنيوم ينتج بشكل ثانوي بعض المياه المحلاة (نحو ٢٤٧٠٠ م³/يوم)، ويقع هذا المصنع إلى الجنوب من العاصمة.

الطريف أن اسم "البحرين" ذاته يبدو على صلة بموضوع كتابنا، إذ توجد حول أرخبيل البحرين ظاهرة فريدة من نوعها. يوجد في أعماق البحر خارج سواحل البحرين العديد من المنابع الحلوة التي تعرف محلياً بسم "الچواچب"!P[١٦٣]P92F كان الأهالي يذهبون إليها في قواربهم حاملين قربهم الجلدية، يغوصون ويملأونها بالماء العذب، ثم يعودون إلى السطح المالح. وكأن هناك بحران: واحد مالح تحته ثان عذب.P[١٦٤]P93F

[١٦٣] حرف الجيم ينطق في اللهجة المحلية كحرفي التاء والشين مضمغين معا، وقد رمزنا لهذا الصوت بالرمز "چ". الكواكب هي ينابيع عذبة على عمق ٣ - ٦ قامة بحرية.

[١٦٤] أنظر شريف قنديل (٢٠٠٦).



الشكل ١٠٤: أقدم محطة تحلية بالطاقة الشمسية في الإمارات (١٩٨٤ . ٢٠٠٢).
المصدر: Chabi & El-Nashar (2009)



الشكل ١٠٥: محطات تجريبية للتحلية بمصادر الطاقة المتجددة في منطقة "غنتوت" بأبوظبي.

كان من الطبيعي أن تتمتع التحلية بأهمية استراتيجية في دول مجلس التعاون الخليجي، وتكثر الأنشطة والمنظمات التي تهتم بهذا الموضوع.



تستضيف المنامة المكتب الإقليمي لغرب أسيا لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP-ROWA). وقد أصدر هذا المكتب دليلاً شاملاً لتقييم الأثر البيئي لمشروعات التحلية أعده نخبة من الخبراء والمتخصصين في هذا المجال.

ويوجد "مركز الشرق الأوسط لأبحاث تحلية المياه Middle East Desalination Research Center" في العاصمة العمانية مسقط، وهو مركز دولي يدعم البحث والتدريب، ويسعى لتبادل المعرفة وبناء القدرات في مجال تحلية المياه.

كما أن المقر الرئيسي لـ "الوكالة الدولية للطاقة المتجددة International Renewable Energy Ageny (IRENA)" يوجد في مدينة "مصدر" بدولة الإمارات العربية، ولهذه الوكالة عدة أنشطة ومنشورات حول مواضيع وقضايا التحلية المتجددة.

التحلية في مصر

العبارة الشعرية الشهيرة للمؤرخ الإغريقي "هيرودوت Herodotus" قبل أكثر من ٢٥٠٠ عاما، "مصر هبة النيل"، تظهر بوضوح اعتماد مصر تاريخياً على نهر النيل كمصدر أساسي وحيد للمياه العذبة. لم يعد ذلك ممكناً الآن لأسباب باتت معروفة للجميع، وأصبح على مصر المعاصرة البحث عن مصادر جديدة للمياه العذبة لتلبية احتياجاتها المتزايدة بشكل سريع. وتعتبر تحلية المياه بالطبع أحد أهم الخيارات المتاحة في الوقت الراهن.

تحلية المياه ليست أمراً جديداً بالنسبة للمصريين، لكنها ظلت محصورة حتى وقت قريب في الأنظمة الصغيرة لخدمة التجمعات السكانية والمواقع الصناعية والسياحية في المناطق النائية. لا يوجد سوى النزر اليسير من البيانات الدقيقة الحديثة حول وضع التحلية في مصر. كما يبدو أن بعض البيانات المتاحة تخلط ما بين تحلية المياه المالحة ومعالجة المياه للأغراض الصناعية. بلغت السعة الإجمالية نحو ١٧٠٠٠٠ م٣/يوم وفقاً لإحدى الدراسات

المنشورة في ٢٠٠٧،P١٦٥P94F في حين أفاد أحد المسئولين في الشركة الوطنية للمياه أثناء عرض شفوي في ٢٠١٢ أن السعة الإجمالية لتحلية ماء البحر كانت في حدود ١٦٦ ٠٠٠ م٣/يوم. تعتبر مثل هذه السعات بالطبع ضئيلة مقارنة مع السعات الهائلة لمحطات التحلية الحديثة. تذهب نحو ٤٢% من المياه المحلاة في مصر إلى قطاع السياحة (المنتجعات السياحية على البحر الأحمر والمصايف على الساحل الشمالي)، وتستخدم الصناعة وتوليد الكهرباء ما يقرب من ٢٠%.

يأتي ترتيب تقنيات التحلية المختلفة حسب استخدامها في مصر كالتالي: التناضح العكسي (٦٨.٥%)، التقطير اللحظي (١٣.٧%)، الفصل الكهربي (١٠.٢%)، التقطير بضغط البخار (٥.١%)، الطرق الهجينة (١.٩%)، والتقطير متعدد التأثير (٠.٥٥%).

تتباين سعات المحطات "القديمة" (ما قبل ٢٠٠٤) ضمن مدى عريض: ٢٤. ٧٣٢ ١١ م٣/يوم، وإن كانت في أغلبها تقع ما بين ٢٠٠ و٥٠٠ م٣/يوم.P١٦٦P95F تدار بعض المحطات الصغيرة الموجودة في مواقع حقول البترول من قبل الشركة المنتجة لأنظمة التحلية، على أن تشتري شركة البترول كمية المياه المنتجة بالأسعار المتفق عليها عند التعاقد.P١٦٧P96F وتؤثر تركيزات الحديد والماغنسيوم بصفة خاصة على تكلفة تحلية الماء المسوس؛ حيث تسبب النسب العالية منهما في ماء التغذية التحشف السريع لأغشية التناضح العكسي، مما يتطلب معالجة سابقة خاصة لإزالتهما.

لقد شهدت السنوات الثلاثة الماضية عدة اتفاقات جديدة بشأن مشروعات كبيرة في مجال التحلية:

أُعلن في أواخر ٢٠١٣ عن شراكة بين "جنرال إلكتريك General Electric (GE)" و"كربون القابضة Carbon Holdings" لبناء مصنع لتكسير النافتا (naphtha cracker plant) هو الأكبر من نوعه في العالم ضمن مجمع صناعي بالعين السخنة. يشتمل ذاك المجمع (الذي

---

[١٦٥] أنظر Batisha (2007).

[١٦٦] أنظر Abou Rayan et al. (2004).

[١٦٧] على سبيل المثال ١.٨٠ دولار للمتر المكعب المنتج من تحلية مياه جوفية (ماء مسوس) يتراوح تركيز المواد الصلبة الذائبة فيها ما بين ٨٠٠٠ ـ ١٤٠٠٠ جزء في المليون.

يتكلف ٣.٨ بليون دولار) على محطة لتوليد الكهرباء والتحلية. ستعتمد محطة التحلية على تقنية التناضح العكسي، وستنتج ٣٨٠٠ متر مكعب في الساعة (≈ ٩١٢٠٠ م³/يوم)، لتكون بذلك أكبر محطة تحلية يخطط لإنشائها في مصر. ستحصل محطة التحلية على الطاقة التي تحتاجها من محطة الكهرباء المصاحبة (وقدرتها ٣٠٠ ميجاوات).

كما وقعت الحكومة المصرية في مارس ٢٠١٥ (خلال مؤتمر شرم الشيخ لدعم وتنمية الاقتصاد المصري) مذكرة تفاهم مع اتحاد أعمال من "ار دبليو ال واتر RWL Water" و"اوراسكوم للإنشاءات المحدودة Orascom Construction Limited" من أجل استكمال دراسات الجدوى الخاصة بمشروع محطة كبرى للتحلية في مصر (سعتها ٨٠٠٠٠ م³/يوم) من أجل مياه الشرب.

في أوائل ٢٠١٦ بدأت الهيئة العامة لقناة السويس إجراءات التعاقد مع "هايفلكس Hyflux" السنغافورية لإنشاء "مشروع العين السخنة المتكامل للكهرباء" (ضمن مشروعات المنطقة الاقتصادية ذات الطبيعة الخاصة لقناة السويس). يتضمن هذا المشروع إقامة محطة مشتركة لتوليد الكهرباء وتحلية المياه. ستنتج هذه المحطة ١٥٠٠٠٠ متر مكعب من المياه يومياً وستولد ٤٥٧ ميجاوات من الكهرباء (لإمداد محطة التحلية بالطاقة اللازمة وإضافة المتبقي إلى شبكة الكهرباء العمومية). تبلغ تكلفة إنشاء هذا المشروع ٥٠٠ مليون دولار (تشمل الهندسة، المشتريات، والإنشاء). يتوقع أن تنتهي عملية التنفيذ في غضون فترة تتراوح بين ٢٠ و٢٨ شهراً من اتمام التعاقد. ووفقاً لشروط التعاقد تتولى هايفلكس إدارة، تشغيل، وصيانة المشروع لمدة ٢٥ سنة في مقابل نسبة متفق عليها تتقاضاها سنويا.[١٦٨]P97F

وفي منتصف ٢٠١٦ (أثناء إعداد هذا الكتاب) تم التوقيع على قرض بـ ٢٩ مليون دينار كويتي (٩٦ مليون دولار أمريكي) من "الصندوق الكويتي للتنمية الاقتصادية العربية" لإنشاء خمس محطات تحلية في محافظة سيناء، هي كالتالي: محطة بسعة ١٠٠٠٠ م³/يوم في كل من رأس سدر، أبوزنيمة، دهب، ونويبع بالإضافة إلى محطة خامسة بسعة ٢٠٠٠٠ م³/يوم في مدينة الطور. كما يتضمن هذا المشروع إنشاء ثماني محطات ضخ وشبكة أنابيب بطول ١٨٣

---

[١٦٨] أنظر WWi (2016) والبورصة (٢٠١٦).

كيلومتراً لتوزيع المياه المنتجة على المناطق السكنية. من المتوقع أن يبدأ العمل في بناء هذه المحطات في مطلع ٢٠١٧ وأن ينتهي في ٢٠١٩.P98F[١٦٩]

تجارب التحلية المتجددة في مصر

تعود تجارب الاستفادة من تكنولوجيا الطاقة الشمسية في مصر إلى عام ١٩١٢، حين بُدأ في إنشاء أول *محطة* طاقة شمسية حرارية بالعالم في منطقة المعادي بجنوب القاهرة (الشكل ١٠٦). قام بتصميم هذه المحطة وأشرف على تشييدها المهندس والمخترع الأمريكي "فرانك شومان Frank Shuman". بُنيت هذه المحطة كي تدير آلة بخارية لضخ مياه الري إلى حقول القطن التي كانت توجد بهذه المنطقة. قامت فكرة المحطة على تركيز أشعة الشمس على *غلاية أنبوبية tube boiler* بواسطة خمسة "عاكسات على شكل قطع مكافيء parabolic reflectors"، طول كل منها ٦٢ متراً وعرضها أربعة أمتار (الشكل ١٠٧)، ثم استخدام البخار المتولد في الغلاية بفعل الأشعة الشمسية المركزة في إدارة مضخة لرفع المياه.[١٧٠] استغرق تشييد هذه الآلة الشمسية عاماً كاملاً، وكانت تضخ ستة آلاف جالون (٢٧ ٣٦٠ لترا) من الماء في الدقيقة الواحدة عند بدء تشغيلها في ١١ يوليو ١٩١٣. وقد تأجل عرض عام لهذه الآلة بسبب انصهار الغلاية المصنوعة من الزنك (بفعل الحرارة الشديدة للبخار)، ولذا جرى استبدال واحدة أخرى بها مصنوعة من الحديد الزهر.

لم يكتب للأسف لتلك التجربة الرائدة الاستمرار والانتشار؛ فقد توقفت تلك المحطة عن العمل بعد مرور أقل من عام على بدء تشغيلها بسبب اندلاع الحرب العالمية الأولى،P[١٧١]P99F ولم يبنى مثلها بعد ذلك أبدا. وقد أدى اكتشاف النفط في ثلاثينات القرن الماضي إلى صرف الاهتمام عن استغلال الطاقة الشمسية، ولم يعد حتى بداية سبيعينات نفس القرن مع زيادة الاهتمام العالمي بحماية البيئة من التلوث.P100F[١٧٢]

---

[١٦٩] أنظر Freyberg (2016)

[١٧٠] كان الغرض الأساسي من هذه المحطة هو توليد الكهرباء، ثم عُدّل إلى رفع وضخ المياه.

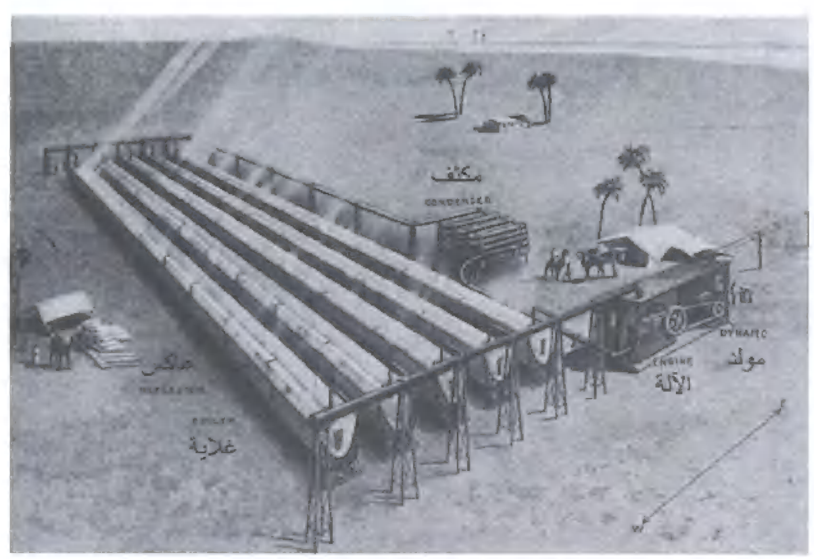
[١٧١] كانت مصر واقعة تحت الاحتلال والوصاية البريطانيين في ذاك الوقت.

[١٧٢] كما كان لـ"حظر النفط" (الذي قامت به دول الخليج ضد الدول المساندة لإسرائيل) أثناء حرب ٧٣ وما تبعه من ارتفاع حاد في أسعاره تأثيرا قويا دفع الدول الصناعية الكبرى إلى البحث بجدية عن مصادر بديلة للطاقة (غير "النفط العربي")



الشكل ١٠٦: أول محطة قوى شمسية في العالم (المعادي في ١٩١٣).

المصدر: Gernsback & Secor (1916)



الشكل ١٠٧: رسم تخطيطي لـ "آلة الشمس واحد".

المصدر: Gernsback & Secor (1916)

بدأت التجارب في مصر على التحلية المتجددة في ١٩٨٠ (جدول ١٧). تعمل محطات التحلية المتجددة القائمة (وجميعها محطات تجريبية صغيرة) بالطاقة الضوء. جهدية، طاقة الرياح، أو بالاثنين معاً (هجينة). سنتناول ببعض التفصيل في الجزء التالي التجربة الأحدث بينها: "محطة وادي النطرون".

بدأت جامعة الإسكندرية في ٢٠٠٨ تجربة لتحلية الماء المسوس من أحد الأبار في منطقة وادي النطرون باستخدام الطاقة المتجددة. شملت المنظومة المستخدمة توربينة (أو عَنَفَة)P[١٧٣]P101F رياح بقدرة ٥ كو (كيلووات) من نوع "فورتيز مونتانا Fortis Montana" (الشكل ١٠٨) ووحدة ضوء. جهدية ٥ كو ذ (كيلووات عند الذروة). وقد قررت الجامعة بعد نجاح التجربة إنشاء محطة أكبر بقدرة ١٠٠ كو.

جدول ١٧: تجارب التحلية المتجددة في مصر. المصدر: Abou Rayan et al. (2004) ومراجع أخرى

الموقع	التقنية	ماء التغذية	السعة (م[٣]/يوم)	عام التشغيل
معهد الجهد العالي، الجيزة	ضج. تع	مسوس	٥-٧	١٩٨٠
الحمراوين	ضج. تع	مسوس	٦٠	١٩٨٦
مرسى مطروح	رياح. تع	بحر	٣٥	١٩٨٧
القاهرة	رياح. تع	مسوس	٣٠٠	١٩٩٥
وادي النطرون	هجينة	مسوس	توضيحية	٢٠٠٨
وادي النطرون	هجينة	مسوس	غير متاحة	٢٠١٢

ضج: ضوء. جهدية؛ تع: تناضح عكسي

يتكون النظام الهجين (رياح وضوء. جهدية) في المحطة الحالية (الشكل ١٠٩) من نظام ضوء. جهدي ٥٠ كو (الشكل ١١٠)، أربع توربينات رياح صغيرة (كل منها ١٢ كو) من شركة "فورتيز Fortis" الهولندية (الشكل ١١١)، ووحدة بطاريات تخزين (الشكل ١١٢). يولد هذا النظام

---

١٧٣ عنفة: آلة يدفعها الماء فتدير آلة أخرى (معجم الرائد)

الكهرباء اللازمة لتشغيل عدة مضخات لمياه الري بالإضافة إلى محطة لتحلية المياه الجوفية. تضمن منظومة البطاريات (٥٠٠ كيلووات ـ ساعة) التشغيل المستمر للمضخات ومحطة التحلية طوال الـ ٢٤ ساعة في اليوم. أنشأت هذه المحطة شركة "يوڤي Juwi" الألمانية المتخصصة في الطاقة المتجددة.

وفي منتجع "النبق" (شمال شرم الشيخ، سيناء) أقامت شركة "واترستلر WaterStillar" (التابعة لشركة "أكوادانيا AquaDania" الدنماركية) وحدتين صغيرتين للتحلية تعتمدان على الطاقة الشمسية الحرارية (مساحتهما متر مربع واحد بالإضافة إلى مجمع شمسي مساحته متران مربعان)، واختبرت قدرتهما (من مايو ٢٠١٢ إلى أبريل ٢٠١٣) على تحلية مياه إحدى الآبار المحلية (الملوثة بمياه الصرف الزراعي والبحر). وقد نجحت تلك المنظومة في تحلية ما يقرب من ٢٤ لتراً في اليوم اعتماداً على الطاقة الشمسية فقط، وزادت إلى ٨٠ - ١٢٠ لتراً عند استخدام طاقة كهربية إضافية أثناء الليل.P102F[١٧٤]



الشكل ٨-١٠: توربينة الرياح في التجربة التوضيحية.

---

[١٧٤] أنظر DHI (2013).



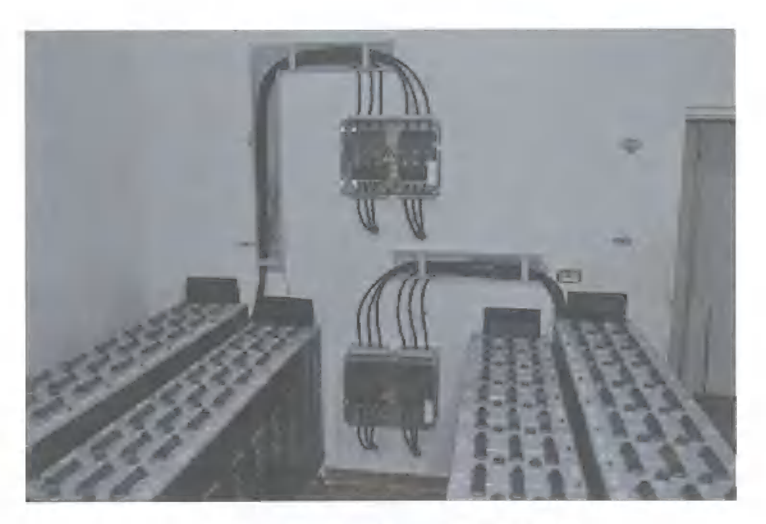
الشكل ١٠٩: محطة وادي النطرون.



الشكل ١١٠: الوحدة الضوء. جهدية.



الشكل ١١١: توربينات الرياح.



الشكل ١١٢: بطاريات التخزين.

١٠. الآثار البيئية لمشروعات تحلية مياه البحر

في ضوء الأهمية الاستراتيجية للتحلية في الكثير من الدول العربية، يجب العمل على الحد من التأثيرات البيئية السلبية لمشروعات التحلية. يمكننا تقسيم هذه التأثيرات إلى المجموعات التالية:

- التأثيرات المرتبطة بسحب مياه البحر؛
- التأثيرات الناتجة عن صرف الأجاج بما يحويه من كيماويات؛
- وانبعاثات ملوثات الهواء نتيجة للاستخدام الكبير للطاقة في هذه المحطات.

سنناقش باختصار في الجزء التالي أهم هذه التأثيرات وبعض الإجراءات المتبعة للحد منها.P103F[١٧٥]

سحب مياه البحر

يمكن سحب المياه الخام (المالحة) من مصادر مختلفة، لكن الشائع هو سحبها من البحر المفتوح. قد يسبب سحب ماء البحر بقوة إلى الإضرار بالأحياء البحرية أو موتها نتيجة لاصطدامها بمصافي السحب (الاصطدام impingement) أو انجرافها مع المياه إلى محطات التحلية (الانجراف entrainment).

تتسبب منشآت السحب أثناء تركيبها في إثارة قاع البحر مما يؤدي إلى اختلاط الرواسب بما تحويه من مغذيات وملوثات بمياه البحر من جديد. وقد تعيق هذه المنشآت بعد اكتمالها حركة المياه والرواسب، أو تصبح بمثابة "شعاب اصطناعية artificial reefs" تسكنها بعض الأحياء المائية.

---

[١٧٥] التقييم الشامل هو أمر خاص بكل مشروع وبكل موقع.

يمكن الحد من الأضرار التي تصيب الأحياء المائية خلال سحب المياه المالحة باستخدام المصافي وخفض شدة السحب. تصلح هذه الإجراءات مع الكائنات البحرية الكبيرة نسبياً كالأسماك والسلاحف، أما الكائنات الصغيرة مثل العوالق البحرية والبيض واليرقات فيمكن الحد من الخسائر فيها باختيار مواقع السحب بعيداً عن أماكن التكاثر. مثل السحب من المياه العميقة، بعيداً عن الشاطئ، أو من آبار تحفرعلى الشاطئ.P[١٧٦]P104F عادة ما تكون المياه المسحوبة من مثل هذه المناطق ذات نوعية أفضل، وهذا من شأنه أن يقلل من الكيماويات المستخدمة في المعالجة السابقة لمياه التغذية.P105F[١٧٧]

يتم الجمع في أغلب المشروعات بدول الخليج بين تحلية المياه وتوليد الكهرباء في محطة واحدة (كما هو الحال في "محطة الطويلة" في الإمارات و"محطة الخبر" بالمنطقة الشرقية في السعودية). عادة ما تكون التأثيرات البيئية الناجمة عن محطة التوليد المشترك أقل من إجمالي التأثيرات البيئية لمحطتين منفصلتين (واحدة للتحلية وأخرى للكهرباء)؛ إذ يمكن في هذه المحطات استخدام الحرارة المفقودة في محطة الكهرباء في تسخين مياه التغذية في محطة التحلية، كما تقل التأثيرات البيئية المرتبطة بعمليات (١) مد خطوط الأنابيب، (٢) سحب مياه البحر، (٣) المعالجة السابقة لمياه التغذية، و(٤) صرف الأجاج.

صرف مخلفات التحلية

يتخلف عن عملية التحلية كميات كبيرة من محلول ملحي مركز (الأجاج)، يكون ذي حرارة عالية نسبياً في حالة استخدام التقنيات الحرارية. يحتوي الأجاج. بالإضافة إلى الملح. على بقايا الكيماويات المستخدمة في معالجة المياه الخام وبعض المعادن الثقيلة (الناتجة من تآكل الأجزاء المعدنية في محطات التحلية). تصرف جميع محطات التحلية الساحلية هذا الـ مُرَكَّز *concentrate* أو الأجاج في البحر. وفيما يلي عرض موجز لأهم التأثيرات البيئية التي قد تحدث من ذلك.

---

[١٧٦] السحب من الآبار الشاطئية يتلاءم فقط مع المحطات الصغيرة والمتوسطة في الحجم.

[١٧٧] في المقابل من المحتمل أن يؤدي حفر الآبار على الشاطئ أو مد أنابيب السحب لمسافات كبيرة داخل البحر إلى زيادة نوعية أخرى من التأثيرات.

الملوحة والحرارة

تتواجد الأنواع البحرية في المناطق ذات الظروف الملائمة لها. وتعتبر ملوحة وحرارة المياه من بين العوامل الرئيسية التي تحكم توزيع الكائنات البحرية. تستطيع أغلب الكائنات البحرية التكيف مع الانحرافات البسيطة عن درجات الملوحة والحرارة المثالية لها، وقد تحتمل بعض الظروف المناوئة فيما لو كانت وقتية. ولذلك من المحتمل أن يشكل الصرف المستمر للمياه مرتفعة الملوحة والحرارة من محطات التحلية خطراً يهدد حياة وبقاء الأنواع التي تسكن أماكن الصرف.P[١٧٨]P106F قد يترتب على ذلك تغيرات دائمة في تركيبة الأنواع السائدة ووفرتها؛ حيث تغادر الأنواع التي لا تناسبها الظروف الجديدة وتأتي مكانها أنواع أخرى لم تكن معروفة من قبل في تلك المناطق.

يكون الأجاج الخارج من محطات التناضح العكسي أكثر كثافة من مياه البحر،[١٧٩] ولذلك فإنه ينتشر فوق قاع المناطق الضحلة (إن لم يتم توزيعه بأنظمة للخلط)، وهو ما يزيد تأثيره على كائنات القاع. على العكس من ذلك يكون أجاج محطات التقطير الحراري؛ حيث تقل كثافته عن كثافة مياه البحر أو تساويها.[١٨٠] ومن ثم يكون تأثيره المباشر على كائنات المياه المفتوحة.

من الوسائل المستخدمة في التقليل من تأثيرات الملوحة العالية للإجاج المصروف خلطه بأنواع أخرى من المياه، مثل صرف محطات توليد الكهرباء، إن توفر ذلك (كما هو الحال في محطة "الغبرة" بعمان (الشكل ١١٣). كما يجب العمل على تخفيض حرارة مياه الصرف قدر المستطاع قبل وصولها إلى مياه البحر (من خلال تمريرها على *أبراج تبريد cooling towers* على سبيل المثال).

يمكن التسريع من عملية الاختلاط بين مياه الصرف ومياه البحر بتركيب *أنظمة مشتتات diffuser systems*، كما هو الحال في محطة الغبرة بعمان (الشكل ١١٤). ويفضّل أن تقع

---

[١٧٨] الأجاج الناتج من التحلية بالتقطير يكون مرتفع الحرارة بسبب عمليات تسخين المياه من أجل تبخيرها.

[١٧٩] بسبب ارتفاع ملوحته عن ملوحة ماء البحر المحيط.

[١٨٠] تتناسب كثافة الماء المالح طرديا مع ملوحته وعكسيا مع حرارته.

مصبات الصرف في الأماكن التي تساعد الظروف الطبيعية بها على التشتيت السريع لنفايات هذه المحطات.

الكيماويات الموجودة في مياه الأجاج

يضاف إلى مياه البحر قبل عملية تحليتها، سواء بالتقطير الحراري أو بالأغشية، مجموعة متنوعة من المركبات الكيماوية:

- مبيدات حياتية biocides؛
- مضادات تجير antiscalants؛
- مجلطات coagulants؛
- موانع فوران antifoaming agents؛
- وكيماويات منظفة cleaning chemicals.



الشكل ١١٣: "محطة الغبرة لتحلية المياه وتوليد الطاقة"، أكبر محطة تحلية بعمان (١٩١ ٠٠٠ مP/٣P يوم).

تحتوي مياه صرف محطات التحلية على بقايا هذه الكيماويات بالإضافة إلى آثار من بعض المعادن الثقيلة (من تآكل الأجزاء المعدنية في معدات المحطة).

المبيدات الحياتية

يضاف غاز الكلور chlorine إلى المياه الخام في أغلب محطات التحلية لقتل الكائنات البحرية الصغيرة وحماية أجهزة التحلية من مشاكل التحشف الحيوي. تتبقى نسبة من هذا الكلور في صرف المحطات (٢٠٠ - ٥٠٠ μج/ل في محطات التقطير و٢٠ - ٥٠ μج/ل في محطات التناضح العكسي). وتنخفض هذه النسبة كثيراً في مياه البحر عند مواقع الصرف (٣٠ - ١٠٠ μج/ل).



الشكل ١١٤: مشتت متعدد المخارج multiport diffuser.

رغم هذا الانخفاض الكبير والسريع في تركيز الكلور بعد الصرف (بفعل التخفيف والتطاير) فإن احتمال تسببه في بعض التأثيرات الضارة يظل قائما؛ فالكلور سام للكثير من الكائنات البحرية، والتركيزات التي وجدت في أماكن الصرف (٣٠ - ١٠٠ μج/ل) هي أعلى بأضعاف من النسب الآمنة (توصي وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة بألا تزيد نسبة الكلور في مياه البحر عن ٧,٥ μج/ل على المدى الطويل و١٣ μج/ل في المدى القصير).كما يمكن لبقايا الكلور أن تتفاعل مع المواد العضوية الموجودة في البيئة البحرية مكونة بعض المركبات الكيماوية *المسرطنة carcinogenic*، مثل مركبات *الميثان المهدرجة trihalomethanes*.

نظراً للتأثيرات المحتملة لبقايا الكلور على الصحة والبيئة يجرى البحث عن بدائل له (مثل التطهير بالأوزون ozone (O_3))، لكن لا يوجد حتى الآن بديل يحظى بالقبول الكافي.

تستخدم العديد من المحطات في منطقة الخليج غاز ثاني أكسيد الكلور chlorine dioxide بدلاً من الكلور في عمليات *التطهير disinfection* (قتل الكائنات الدقيقة في المياه الخام). ثاني أكسيد الكلور هو سام أيضا، لكن يفترض أنه يكون كميات أقل من مركبات الميثان المهدرجة المسرطنة، ولذلك يعتبر أفضل نسبياً من الكلور من منظور الصحة البيئية.

يمكن إزالة الكلور من تصريفات محطات التناضح العكسي عن طريق معالجتها بكبريتيت الصوديوم الثنائية sodium bisulfite، وتقترح بعض الدراسات استخدام ثاني أكسيد الكبريت sulfur dioxide وفوق أكسيد الهيدروجين hydrogen peroxide (ماء الأكسجين) في معالجة صرف المحطات الحرارية.P107F[١٨١]

المعادن الثقيلة

تصنع *المبادلات الحرارية heat exchangers* في محطات التقطير الحراري من سبائك النيكل والنحاس. لذلك يحتوي صرف المحطات الحرارية على آثار من النحاس (١٥ - ١٠٠ µج/ل).P[١٨٢]P108F تتراوح تركيزات النحاس الموجود أصلاً في مياه البحار من ٠.١ µج/ل في المحيطات إلى ١٠٠ µج/ل عند مصبات الأنهر.P[١٨٣]P109F هذا يعني أن التركيزات الموجودة في صرف المحطات الحرارية قد تغير كثيراً من تركيزات النحاس الأصلية في مواقع الصرف (ما يعرف بـ *تركيزات الخلفية background concentrations*).

توصي وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة بألا تزيد نسبة النحاس في مياه البحر عن ٣,١ µج/ل في المدى الطويل و٤,٨ µج/ل في المدى القصير. ويقدر "التركيز الآمن" بالنسبة للنحاس بـ ٥.٦ µج/ل.P[١٨٤]P110F

---

[١٨١] أنظر Khordagui (1992) وShams El Din & Mohammed (1998).

[١٨٢] وجود النحاس في صرف محطات التحلية لا يعني بالضرورة أنه سيؤثر تأثيرا ضارا على البيئة.

[١٨٣] يتراوح تركيز النحاس في الخليج العربي ما بين أقل من واحد µج/ل في قطر إلى ٢٥ µج/ل في الكويت.

[١٨٤] التسمية الفنية للتركيز الآمن هي *التركيز المتوقع لانعدام التأثير predicted no-effect concentration* (PNEC).

ينتقل النحاس، كغيره من المعادن، إلى رواسب القاع ويتراكم بها. تتركز هذه المعادن في داخل أجسام كائنات القاع، ومن ثم في باقي كائنات السلسلة الغذائية (راجع التراكم الأحيائي والتكبير الحيوي في إطار ١).

قد يحتوي صرف محطات التناضح العكسي على آثار من الحديد، النيكل، الكروم، والموليبدنوم لكنها عادة ما تكون ضئيلة لأن معدات هذه المحطات تصنع في أغلبها من الصلب المقاوم للصدأ ومن المواد غير المعدنية.

مضادات التجير

التجير (أو *التكلس*) *scaling* مشكلة مألوفة لنا جميعا: تجير صنابير المياه، الغلايات الكهربائية، وحتى الأسنان. تضاف إلى المياه الخام في محطات التحلية بعض المواد التي تحد من مشكلة التجير. يطلق على هذه المواد اسم *مضادات التجير antiscalants*، وهي تشمل مجموعة متنوعة من المركبات الكيميائية مثل *الأحماض الكربونية المتعددة polycarbonic acids* و*الفوسفوناتات phosphonates*. تستخدم أيضاً *الفوسفاتات المتعددة polyphosphates* و*حامض الكبريتيك sulfuric acid* كموانع للتجير، ولكن على نطاق محدود. وتعتبر جميع مضادات التجير ضئيلة السمية للحياة البحرية.

لوحظ أن مشكلة *التنامي (التتريف) eutrophication* تظهر حول مصبات المحطات التي تستخدم الفوسفاتات المتعددة في منطقة الخليج؛ من المعروف أن الفوسفات المتعددة تتحلل بسهولة في الماء إلى الفوسفاتات الخماسية orthophosphates التي تعد مغذياً رئيسياً للنباتات المائية (*المنتجين الأوائل primary producers*).

على عكس الفوسفاتات المتعددة تتميز الأحماض الكربونية المتعددة والفوسفوناتات بأنها مركبات ثابتة بطيئة التحلل في الماء، ولذلك تتبقى في المياه الساحلية لفترات طويلة. ولأن هذه المواد تعمل على منع التجير في محطات التحلية من خلال ارتباطها مع أيونات الكالسيوم والماغنسيوم وتشتيتها لهذه العناصر في مياه التغذية فإنها قد تؤثر أيضاً على

سلوك هذين العنصرين وغيرهما من المعادن *ثنائية التكافؤ divalent* الموجودة طبيعياً في البيئات البحرية.

المجلطات (في التناضح العكسي)

يضاف إلى المياه الخام في محطات التناضح العكسي كلوريد الحديديك وكيماويات أخرى (مثل البولي أكريلاميد polyacrylamide) كي تساعد على تخثر وتجلط *المواد العالقة suspended material*، تعرف هذه المواد بسم *المجلطات coagulants* و*مساعدات التجلط coagulation aids*. تمرر المياه بعد ذلك على مجموعة من المرشحات لإزالة "الجلطات" أو "الخثرات" المتكونة. تغسل هذه المرشحات على فترات متقطعة، وتصرف مياه الغسيل بما تحويه من مجلطات ومواد عالقة على البحر دون معالجة. رغم أن الكيماويات المستخدمة في *التجليط coagulation* ليست ذات سمية عالية إلا أنها قد تتسبب في تعكر مياه البحر وتلونها باللون الأحمر، فتنخفض كمية الضوء التي تصل إلى الكائنات البحرية. وقد يؤدي ترسب هذه المواد إلى دفن *كائنات القاع المرابطة sessile benthic organisms*.

موانع الفوران (في التقطير الحراري)

تضاف بعض المواد إلى المياه في محطات التقطير الحراري للحد من فوران المياه عند تبخيرها. تضم هذه المواد مركبات عضوية مثل جلايكولات البولي إثيلين والبولي بروبيلين polyethylene and polypropylene glycols. هذه المركبات ليست سامة ولكنها صعبة التحلل، ولذلك تبقى طويلاً في المياه.

كيماويات التنظيف

تختلف إجراءات التنظيف وفقاً لنوع التحشف المراد إزالته. تستخدم المحاليل القلوية (رقم حموضة ١١ - ١٢) لإزالة ترسبات الرمل والغشاوات الحياتية (ترسبات الأحياء البحرية الصغيرة) من الأغشية (في محطات التناضح العكسي)، في حين تستخدم المحاليل الحمضية

لإذابة أكاسيد المعادن أو طبقات الجير. تحتوي هذه المحاليل في العادة على كيماويات إضافية، مثل المنظفات الصناعية والعوامل المؤكسدة، من أجل تحسين عملية التنظيف. بعد التنظيف يجرى تطهير أغشية التناضح العكسي بالمبيدات الحياتية. أما محطات التقطير فتُغسل بمياه البحر الحمضية الدافئة لإزالة طبقات الجير القلوية من أسطح المبادلات الحرارية (التي قد تحتوي على بقايا من المواد المثبطة للتآكل). قد تكون محاليل التنظيف هذه، بما تحويه من إضافات، ضارة للأحياء المائية إذا ما صرفت على البحر دون معالجة. لذا يجب معالجة محاليل التنظيف قبل أن تصرف على البحر مباشرة، أو يجرى صرفها على شبكة الصرف الصحي.

استخدام الطاقة وتلوث الهواء

تستخدم محطات التحلية مقادير كبيرة من الطاقة.P[١٨٥]P111F وقد ساعدت أنظمة استرجاع الطاقة واستخدم الحرارة المفقودة في خفض احتياج محطات التحلية من الطاقة. هناك أيضاً محاولات لاستخدام مصادر *الطاقة* المتجددة في عمليات تحلية المياه، كما هو الحال في محطة "بيرث Perth" الأسترالية التي تستمد جزءاً من احتياجاتها من الطاقة من مزرعة رياح "امو داونز Emu Downs" بجنوب غرب أستراليا (الشكل ١١٥).

تحتاج محطات التحلية إلى الطاقة الحرارية والكهربائية، ومازال المصدر الرئيسي لكلا النوعين هو *الوقود الأحفوري fossil fuel*. لذا ينتج عن إنشاء محطات التحلية انبعاثات لملوثات الهواء و*غازات الصوبة/الدفيئة greenhouse gases*، مما يفاقم من مشكلة التغيرات المناخية. تستهلك أفضل محطات تحلية ماء البحر بالتناضح العكسي من ٣ . ٤ كوس/مP٣P (كيلووات . ساعة للمتر المكعب) وتبث من ١.٤ - ١.٨ كج من ثاني أكسيد الكربون لكل متر مكعب من المياه المنتجة (جدول ١٨).P[١٨٦]P112F لتخيل حجم هذه التأثيرات تحتاج إسبانيا

[١٨٥] للتوضيح، الطاقة التي تستخدمها محطة تناضح عكسي توفر المياه لنحو ٤٨ ألف وحدة سكنية تعادل الطاقة المطلوبة لإمداد الكهرباء لأكثر من ١٠ آلاف وحدة من تلك الوحدات السكنية. قدرت الإنباعاثات الغازية الناتجة عن محطات التوليد المشترك في بعض دول الخليج العربي بحوالي ٣٠% من حجم الإنبعاثات الغازية الإجمالية بهذه الدول (محكم الكتاب).

[١٨٦] أنظر Fritzmann et al. (2007)، Von Medeazza (2005)، وRaluy et al. (2006).

لوحدها إلى ٤٠٠٠ ﭽوس (ﭽيﭽاوات. ساعة) من أجل انتاج احتياجاتها السنوية المتوقعة من المياه المحلاة (بليون متر مكعب).P113F[١٨٧]

أهمية الموقع

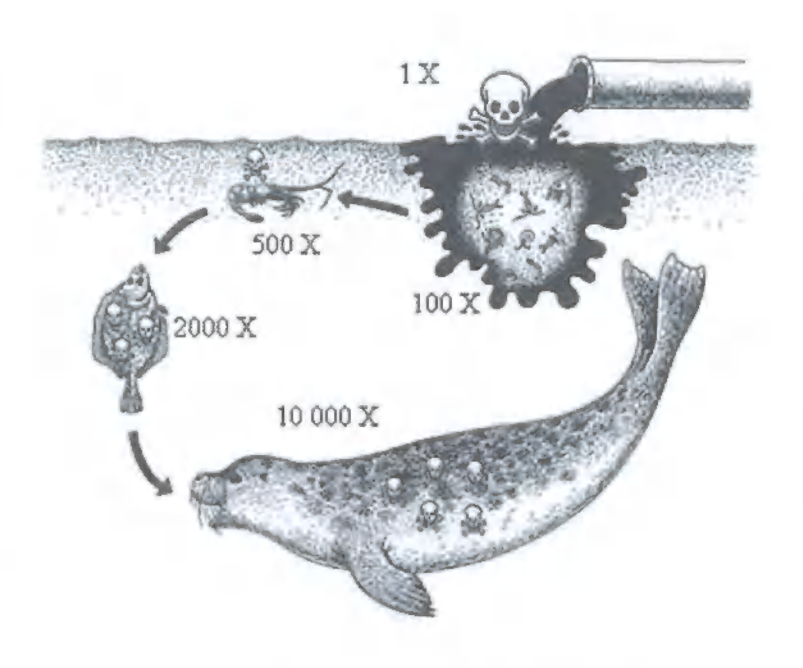
الاختيار الجيد لمواقع (١) إقامة المحطات، (٢) سحب مياه البحر، و(٣) صرف المخلفات هو من أهم العوامل التي تساعد في الحد من الآثار البيئية السلبية لمشروعات تحلية مياه البحر، كما أنه يحافظ على سلامة المحطات ويحسن من كفاءتها.

غالبا ما تكون مياه المناطق العميقة والبعيدة عن الشاطئ أكثر جودة وصفاء. وكذلك هو الحال بالنسبة للمياه المأخوذة من تحت رمال الشاطئ (الآبار الشاطئية). علاوة على ذلك يجب تجنب المناطق المعرضة لمخاطر التلوث بالنفط (مثل تلك القريبة من طرق ناقلات النفط أو المنصات البحرية).



الشكل ١١٥: مزرعة رياح "امو داونز Emu Downs" بجنوب غرب أستراليا.

[١٨٧] أنظر Von Medeazza (2005).



إطار 1: التراكم الأحيائي والتكبير الأحيائي للملوثات.

يتراكم الكثير من الملوثات السامة في أجسام الكائنات الحية. يحدث هذا *التراكم الأحيائي* *bioaccumulation* نتيجة لعجز أجهزة الإخراج في هذه الكائنات عن إزالة هذه السموم بنفس المعدل الذي تدخل به إلى أجسام الكائنات. على سبيل المثال، إذا كان تركيز مادة سامة في مياه الصرف هو ١س (1X)، نجد تركيز هذه المادة قد تضاعف مئات المرات في الكائنات البحرية الصغيرة، آلاف المرات في الأسماك الصغيرة، وعشرات الآلاف في الكائنات البحرية الكبيرة وفي الطيور التي تتغذى على الأسماك. يطلق على هذا التزايد في تركيز المواد السامة بأجسام الكائنات الحية من خلال الغذاء الذي تتناوله اسم *التكبير الأحيائي* *biomagnification*.

أظهرت إحدى الدراسات عن التكبير الأحيائي لمبيد الدي دي تي DDT في بحيرة كاريبا Lake Kariba بتنزانيا الآتي: كان تركيز المبيد في مياه البحيرة أقل من ٠.٠٠٢ جزء في المليون (جفم)؛ تركيزه في رواسب البحيرة ٠.٤ جفم؛ في الطحالب ٢.٥ جفم؛ في المحار ١٠ جفم؛ في الأسماك الصغيرة ٢ - ٦ جفم؛ في الأسماك المفترسة والطيور البحرية التي تتغذى على الأسماك ٥ - ١٠ جفم؛ وفي تماسيح النيل ٣٤ جفم.

جدول ١٨: انبعاثات الهواء لكل متر مكعب من المياه المحلاة بالتقنيات الرئيسية.
المصدر: Al-Ansari & Al-Masri (2010)

	ت ل م		ت م ت		تع
ملوث الهواء	وقود أحفوري	حرارة ضائعة	وقود أحفوري	حرارة ضائعة	وقود أحفوري
CO_2 (كچ)	٢٤	٢.٠	١٨	١.١	١.٨
أتربة (چ)	٢.٠	٢.٠	١.٠	١.٠	٢.٠
NOx (چ)	٢٨	٤.١	٢١	٢.٤	٣.٩
مع م (چ)	٧.٩	١.٢	٥.٩	٠.٦	١.١
SOx (چ)	٢٨	١٥	٢٦	١٦	١١

ت ل م: تقطير لحظي متعدد؛ ت م ت: تقطير متعدد التأثير؛ تع: تناضح عكسي؛ م ع م: مواد عضوية متطايرة

يجب أن يتوفر للمحطة مصدر دائم للمياه الخام جيدة النوعية. ولذلك يجب البعد عن المناطق المعرضة للتلوث، مثل المناطق القريبة من مصبات الصرف الصحي أو الصناعي وطرق النقل البحري. كما يجب تجنب الأماكن التي تنخفض فيها جودة المياه لأسباب طبيعية، خاصة الأماكن التي يكثر بها نمو الأعشاب والطحالب البحرية أو ذات المياه العكرة.

١١. التقنيات الجديدة في التحلية

البحث لا يتوقف عن طرق وتقنيات جديدة للتحلية. ويوجد حالياً العديد من طرق وتقنيات التحلية الجديدة في مراحل مختلفة من التطور. لنتعرف معاً على بعض أهم هذه التقنيات.

التناضح الأمامي

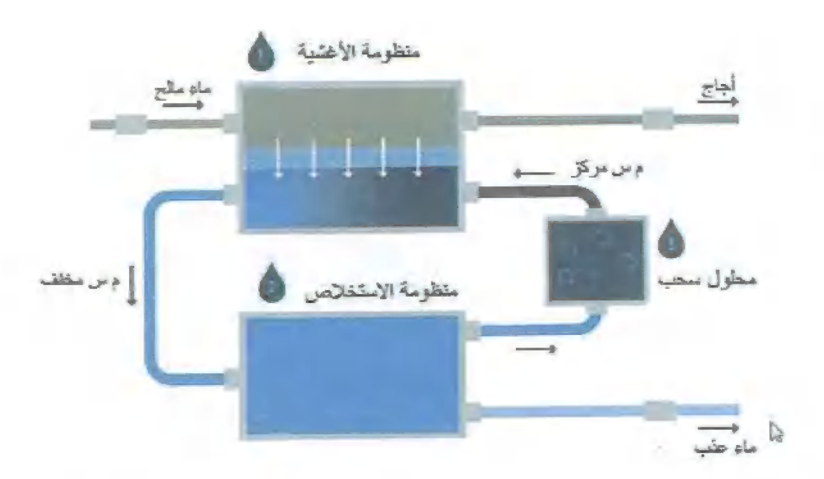
يستخدم في طريقة *التناضح الأمامي forward osmosis* (شكل ١١٦) محلول مركز من مركب ذات جزيئات كبيرة لسحب جزيئات الماء من الماء المالح عبر أغشية شبه منفذة (*محلول السحب draw solution*). يمرر بعد ذلك محلول السحب المخفف إلى منظومة خاصة لفصل كيماوية السحب (المادة الذائبة في محلول السحب) عن الماء المسحوب (منظومة الاستخلاص). يذهب الماء الخارج من منظومة الاستخلاص (أي المُحلّى) إلى مراحل معالجة ما بعد التحلية التالية، ويعاد استخدام كيماوية السحب من جديد. كربونات الأمونيوم هي واحدة من أولى الكيماويات التي استخدمت لسحب المياه بالتناضح الأمامي. تزال كربونات الأمونيوم من الماء المسحوب عن طريق تسخين محلول السحب، فتتحلل وتـ شكل غازيّ ثاني أكسيد الكربون والأمونيا:

كربونات الأمونيوم ← أمونيا + ثاني أكسيد الكربون + ماء

$$(NH_4)_2CO_3 \rightarrow 2NH_3 + CO_2 + H_2O$$

يستخلص هذين الغازين ويجرى تدويرهما من جديد.P١٨٨P114F

[١٨٨] أنظر McCutcheon et al. (2005).



شكل ١١٦: رسم تخطيطي لعملية التحلية بالتناضح الأمامي. المصدر: OASYS Water

تجرى الاختبارات حديثاً على مجموعة متنوعة من الكيماويات الأخرى، بما فيها *الجزيئات النانوية nanoparticles* التي تتميز بالرخص وسهولة الاستخلاص، من أجل استخدامها لسحب الماء في هذه الطريقة.P115F[١٨٩]

يمكن استخدام الماء المالح وطريقة التناضح الأمامي في صناعة العصائر. يوضع العصير المركز ملاصقاً لغشاء شبه منفذ يفصله عن الماء المالح. تنتقل جزيئات الماء من الماء المالح في اتجاه العصير المركز فيخفف جزئيا. يضاف بعد ذلك إلى مركز العصير ما يلزم من الماء العذب للحصول على التركيز المطلوب في المنتج النهائي.

أُنشأت أول محطة تحلية بالتناضح الأمامي في عُمان، وقد بدأت في الإنتاج عام ٢٠١٢ بسعة قدرها ٢٠٠ م^{٣}/يوم. أقيمت في الولايات المتحدة الأمريكية عدة محطات أخرى لمعالجة *المياه المنتجة produced water* من حقول الغاز، والتي يصل تركيز المواد الصلبة الذائبة بها إلى ١٢٥٠٠٠ مج/ل.[١٩٠] وقد استطاعت هذه المحطات إنتاج مياه محلاة بالجودة المطلوبة لمياه الشرب.P116F[١٩١]

---

[١٨٩] أنظر McCutcheon & Bui (2014).

[١٩٠] المياه المنتجة هي المياه التي توجد مصاحبة للنفط والغاز في باطن الأرض، وهي مياه شديدة الملوحة.

[١٩١] أنظر Clayton (2015).

التقطير بالأغشية

يوضح الشكل ١١٧ فكرة عمل التقطير بالأغشية. تتكون منظومة التقطير بالأغشية من غشاء مسامي *كاره للماء hydrophobic* يفصل بين محلولين مائيين، أحدهما بارد والآخر ساخن (الماء المالح). تمنع كراهية الغشاء للماء مرور أي من المحلولين عبر الغشاء (لكنها لا تمنع مرور بخار الماء). ونظراً للاختلاف بين حرارة المحلولين على جانبي الغشاء المسامي، يكون ضغط جزيئات البخار (ما يعرف بسم *الضغط الجزئي partial pressure* لبخار الماء) ناحية الماء المالح (الساخن) أعلى منه في الناحية الأخرى، فينتقل بخار الماء عبر مسام الغشاء إلى الجانب البارد من الغشاء ليتكثف على شكل قطرات من الماء "المحلى" (منزوع الأملاح).

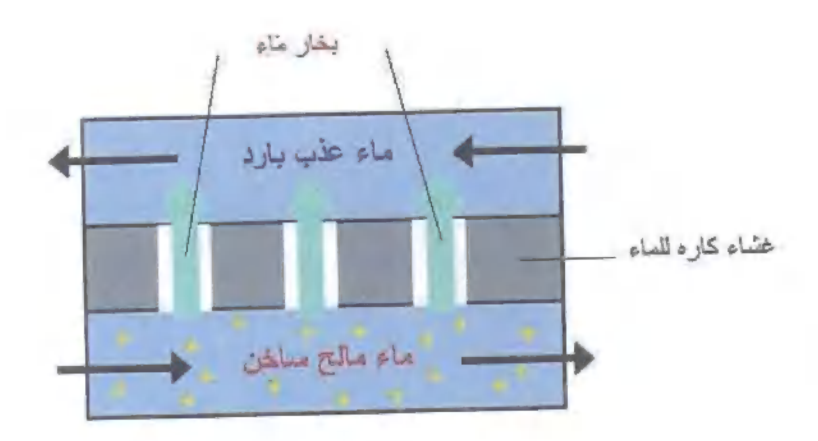
تعود فكرة التقطير بالأغشية إلى أواخر الستينات، وإن لم يجرى استخدام هذه التقنية بشكل تجاري في ذاك الوقت بسبب عدم توافر الأغشية المناسبة وارتفاع أسعارها. مع توافر أنواع جديدة من الأغشية في حقبة الثمانينات عاد البحث من جديد في امكانية استخدام هذه التقنية، وظهرت عدة تصميمات حديثة لوحدات التقطير بالأغشية.P[١٩٣]P117F

من بين مميزات هذه التقنية احتياجها لحرارة أقل مما تحتاجها طرق التقطير التقليدية، ولضغط أقل من المستخدم في عمليات الأغشية التقليدية.

هناك بعض محطات التقطير بالأغشية من أجل إنتاج مياه الشرب، لكنها صغيرة السعة نسبياً (تنتج من ٥٠-١٠٠٠ لتر في الساعة) وتستهدف التجمعات الصغيرة. تتميز هذه المحطات بقدرتها على إنتاج المياه المحلاة بتكلفة اقتصادية. أقيمت أول محطة تقطير بالأغشية تستخدم الحرارة المفقودة (من إحدى محطات القوى المحلية) في العام ٢٠١٤ على جزيرة "جولهي Gulhi" بالمالديف. ويتوقع أن يؤدي تطوير الأغشية الخزفية ceramic membranes إلى إمكانية استخدام حرارة أعلى في هذه التقنية، وبناء محطات أكبر من التي صنعت حتى الآن.

---

[١٩٣] أنظر Camacho et al. (2013).



الشكل ١١٧: رسم تخطيطي لعملية التقطير بالأغشية.

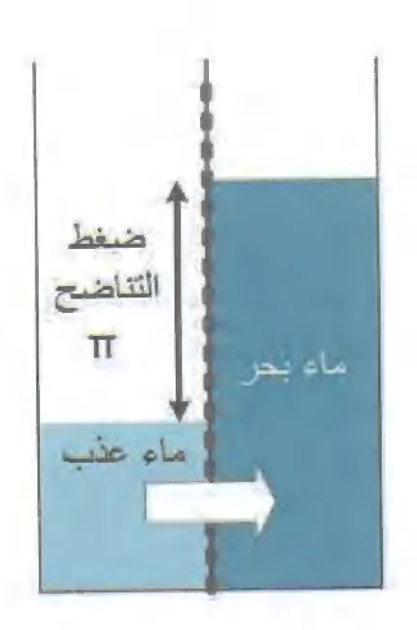
١٢. زيارة للتناضح العكسي من جديد

عرفنا أن التكلفة المرتفعة نسبياً هي المعوق الأول لقبول تحلية ماء البحر كوسيلة يمكن تطبيقها لزيادة المعروض من المياه العذبة، وأن مقدار الطاقة المستخدمة هو المحدد الرئيسي لتكلفة المياه المحلاة. وعرفنا أن التناضح العكسي هو أقل تقنيات التحلية الصناعية استخداماً للطاقة (ومن ثم أقلها تلويثاً للجو)، وأنه هو الوسيلة المفضلة الآن للتحلية على مستوى العالم (ربما باستثناء دول الخليج). لذلك نحتاج إذا أردنا استشراف مستقبل التحلية إلى فهم أعمق لبعض الجوانب الفنية لعملية التناضح العكسي، خاصة المتعلقة منها بالطاقة والأغشية.

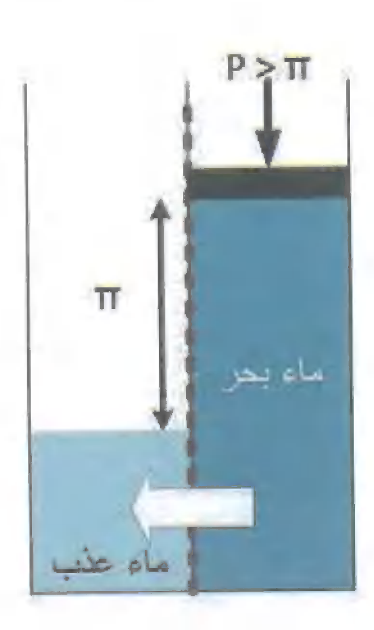
طاقة التحلية

نحن نعرف الآن أننا إذا فصلنا بين ماء البحر المالح والماء العذب بغشاء شبه منفذ، فإن جزيئات الماء تمر عبر الغشاء في كلا الاتجاهين، لكن المحصلة النهائية تكون بانتقالها إلى القسم الذي به ماء البحر حتى يتساوى الفرق بين ضغطي عامودي الماء في القسمين بضغط التناضح (الشكل ١١٨، راجع الجزء الخاص بالتناضح وضغط التناضح). يرمز لضغط التناضح بالحرف اليوناني "پاي Π". ويزداد ضغط التناضح بزيادة الفرق في الملوحة بين السائلين.

إذا أردنا تحلية ماء البحر بالتناضح العكسي، فإننا نحتاج إلى دفعه خلال الغشاء شبه المنفذ بضغط خارجي (P) يزيد عن ضغط التناضح (Π) (الشكل ١١٩). لذلك يمكن اعتبار ضغط التناضح (Π) هو الضغط الأدني من الناحية النظرية (وفقاً لقوانين الفيزياء) اللازم لحدوث التناضح العكسي.

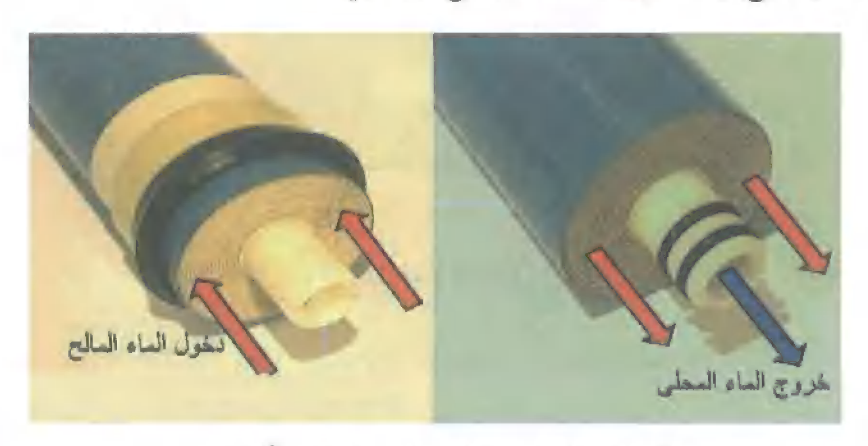


الشكل ١١٨: التناضح العادي (الأمامي).

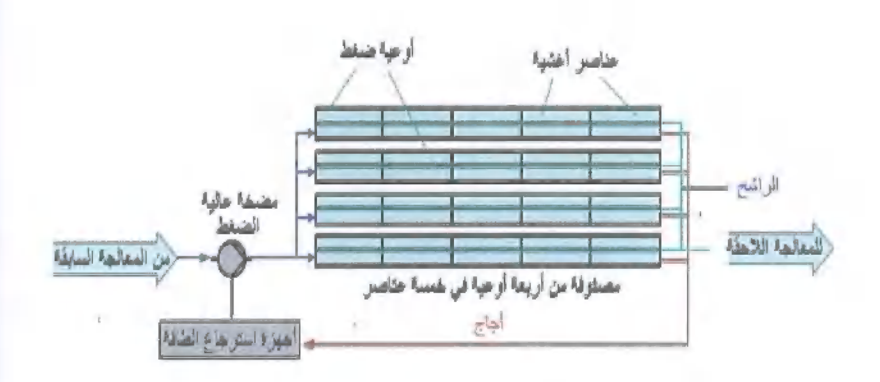


الشكل ١١٩: التناضح العكسي، الضغط الخارجي (*P*) أكبر من ضغط التناضح (Π).

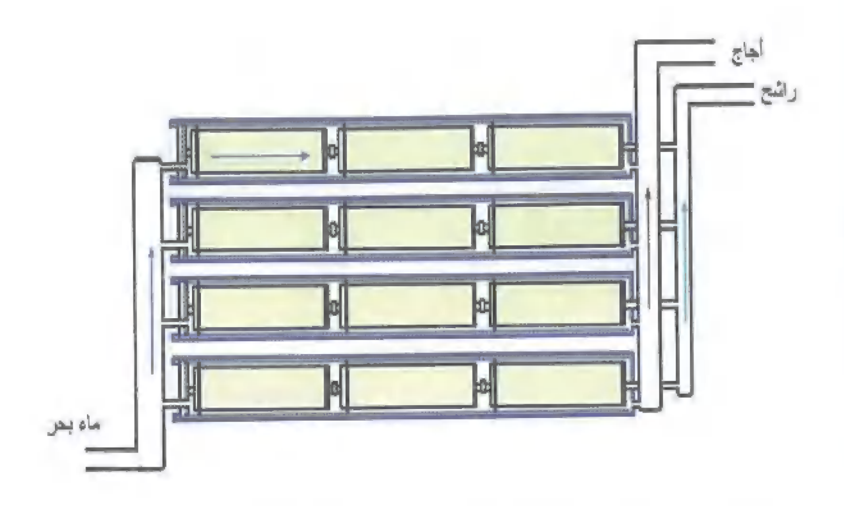
يوضح الشكل ١٢٠ التصميم النموذجي لأنظمة التحلية الصناعية بالتناضح العكسي. في هذه الأنظمة، يضخ ماء البحر المنقى (خلال مرحلة المعالجة السابقة) تحت ضغط عال إلى أوعية الضغط الاسطوانية. يحتوي كل وعاء أسطواني (أو وحدة module) على عنصر واحد إلى ثمانية عناصر من الأغشية الملفوفة حلزونياً (الشكل ١٢١). تتصل عناصر كل وعاء معاً على التوالي بحيث أن الأجاج الخارج من أحد العناصر يكون ماء التغذية الداخل للعنصر التالي (الشكل ١٢٢). لذلك تزداد *نسبة الاستخلاص recovery ratio* (كمية المياه المحلاة ÷ كمية مياه التغذية) مع زيادة طول وحدات التناضح العكسي.



الشكل ١٢٠: صورة عن قرب لعنصر أغشية.



الشكل ١٢١: نظام التحلية الصناعية بالتناضح العكسي. المصدر: Lenntech



الشكل ١٢٢: وحدات التناضح العكسي وعناصر الأغشية. المصدر: Lenntech

يخرج الأجاج من وحدات التناضح العكسي محتفظاً بجزء كبير من طاقته. يصل إلى ٥٥% (يتوقف الهبوط في الضغط خلال الوعاء الأسطواني على عدد عناصر الأغشية الموجودة به). ويمكن استخدام طاقة الأجاج في عملية التحلية من جديد بفضل أجهزة استرجاع الطاقة. من أمثلة هذه الأجهزة توربينات استرجاع الطاقة energy recovery turbines (ERTs) ومبادلات الضغط pressure exchangers (PXs) (الشكل ١٢٣).

لندرس الآن بشيء من التفصيل احتياجات التناضح العكسي من الطاقة. تحتاج عملية التحلية بالتناضح العكسي إلى الطاقة في جميع مراحلها، وأساساً في مراحل الفصل (فصل الماء عن الأملاح)، المعالجة السابقة، والمعالجة اللاحقة.

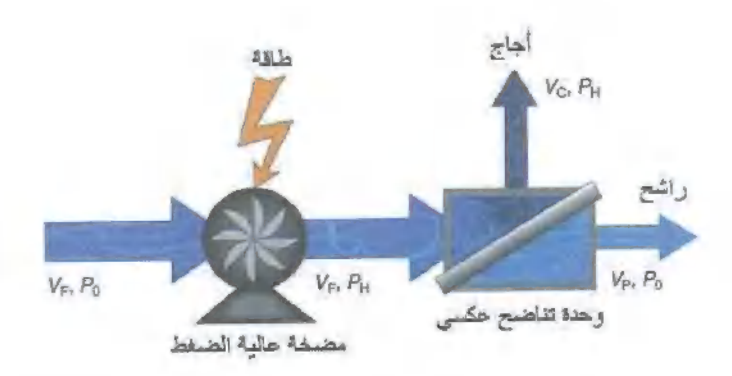


الشكل ١٢٣: أمثلة على أجهزة استرجاع الطاقة.

لنبدأ بالطاقة المطلوبة لمرحلة الفصل. تُدفع كمية من ماء التغذية المضغوط، حجمها V_F، إلى وحدة التناضح العكسي المحتوية على الأغشية شبه المنفذة. يخرج من هذه الوحدة نوعان من المياه: (١) راشح من المياه النقية، حجمه V_P، و(٢) أجاج يحتوي على الأملاح المحتجزة، حجمه V_C (الشكل ١٢٤).

تدخل الطاقة التي تحتاجها عملية الفصل إلى المنظومة من خلال مضخة تدفع مياه التغذية بضغط عال (قدره P_H). مقدار هذه الطاقة هو $V_F P_H$. يظل الأجاج الذي يخرج من وحدة الأغشية محتفظاً بطاقة مقدارها $V_C P_H$. ويمكن استخلاص هذه الطاقة ونقلها إلى مياه التغذية بواسطة أجهزة استرجاع الطاقة. تستهلك الطاقة الموجهة لـ "ترشيح" المياه (فصلها عن الأملاح)، ومقدارها $V_P P_H$، في مهمتين: الأولى هي الوصول بضغط كمية

المياه المراد تحليتها إلى ضغط التناضح،P[١٩٣]P118F ويلزمها طاقة مقدارها $VR_PR\Pi R_SR$ ؛ الثانية هي توفير إفاضة معقولة للمياه الراشحة (المحلاة)، وتحتاج لطاقة مقدارها $VR_PR(PR_HR - \Pi R_SR)$.



الشكل ١٢٤: رسم تخطيطي للتدفقات والضغوط في منظومة تحلية بالتناضح العكسي.
المصدر: Elimelech & Phillip (2011)

المقدار $VR_PR\Pi R_SR$ هو أدنى كمية من الطاقة لازمة لفصل المياه النقية عن الأجاج، أي ما يعرف اختصاراً بسم *الطاقة الأدنى نظرياً theoretical minimum energy*. يرتفع مقدار هذه الطاقة مع زيادة ملوحة مياه التغذية ونسبة الاستخلاص في وحدة التناضح العكسي (الشكل ١٢٥).P[١٩٤]P119F على سبيل المثال، الطاقة الأدنى نظرياً لتحلية ماء بحر تركيز الأملاح به ٣٥٠٠٠ جزء في المليون مع نسبة استخلاص ٥٠% هي ١.٠٦ كوس/مP[٣]P (كيلوواط ـ ساعة للمتر المكعب).

يتوقف مقدار الضغط الزائد عن ΠR_S واللازم لتوليد *تدفقات flows* مناسبة من المياه، أي المقدار $(PR_HR - \Pi R_SR)$، على *نفاذية الأغشية membrane permeability*. وفي جميع

[١٩٣] هناك أكثر من منظور لتعريف ضغط التناضح، والتعريف الأنسب هنا هو "مقياس لميل محلول ما لجذب الماء بالتناضح".

[١٩٤] تزداد ملوحة الأجاج الناتج من عملية التحلية مع زيادة ملوحة ماء التغذية أو نسبة الاستخلاص، ومن ثم يزداد ضغط التناضح للأجاج.

الأحوال لا يمكننا خفض الضغط المستخدم (*P*R$_H$R) ـ مهما زادت نفاذية الأغشية ـ عن ضغط التناضح (ΠR$_S$). لذلك لابد أن يكون ضغط ماء البحر الداخل إلى أول عنصر أغشية في وحدة التناضح العكسي مساوياً على الأقل لضغط التناضح للأجاج الخارج من آخر عنصر (أي ΠR$_C$R < *P*R$_H$R). ويقال في هذه الحالة أن نظام التحلية يعمل "عند حد *الحراك ـ الحراري* at the *thermodynamic limit*".

لقد انخفضت الطاقة المستخدمة في عملية الفصل كثيراً خلال العقود الثلاثة الماضية، وأصبحت محطات التحلية الحديثة تعمل قريباً من حد الحراك الحراري (الشكل ١٢٦).[١٩٥]P120F

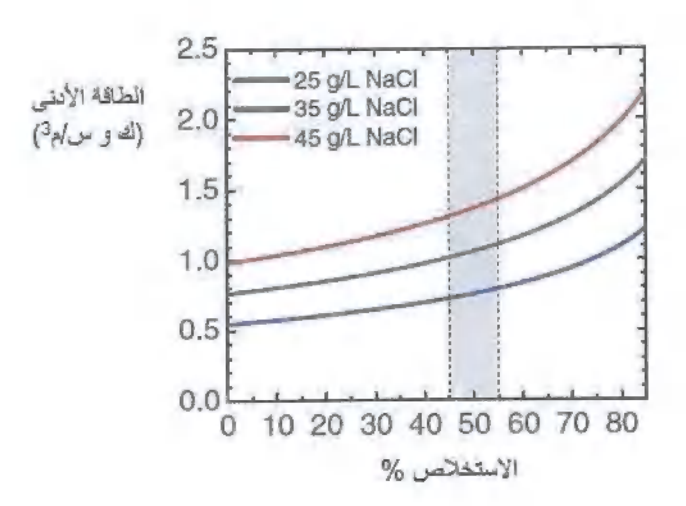
تحتاج باقي مراحل التحلية (سحب المياه، المعالجة السابقة، المعالجة اللاحقة، وصرف الأجاج) أيضاً إلى الطاقة. وتنال المعالجة السابقة نصيب الأسد من هذه الطاقة الإضافية.

تستهلك محطات التناضح العكسي الأكثر تطوراً ما بين ٣ - ٤ كوس/مP^{٣}P، منها نحو ٢ كوس/مP^{٣}P في عملية الفصل والباقي (أكثر من ١ كوس/مP^{٣}P) يستهلك في مراحل التحلية الأخرى.[١٩٦]P121F

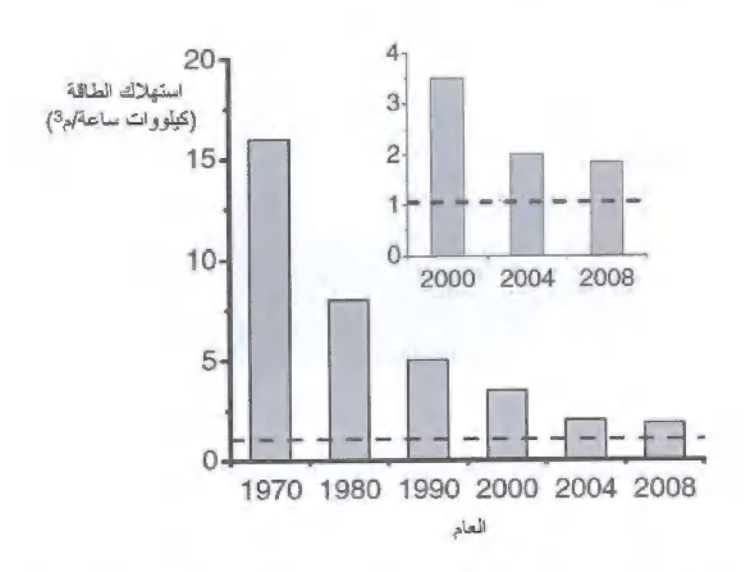
---

[١٩٥] أنظر Elimelech & Phillip (2011).

[١٩٦] المرجع السابق



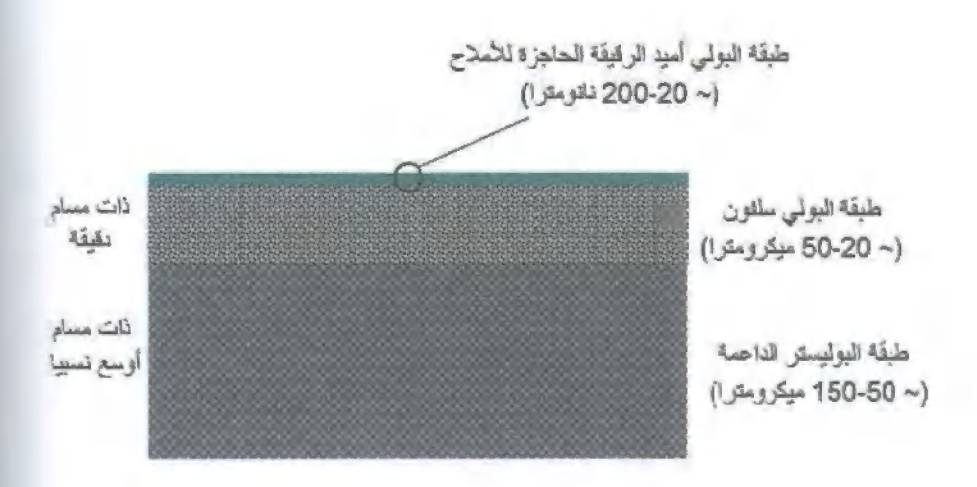
الشكل ١٢٥: الطاقة الأدنى نظرياً للتحلية وعلاقتها بنسبة الاستخلاص وملوحة ماء البحر المستخدم. المصدر: Elimelech & Phillip (2011)



الشكل ١٢٦: انخفاض استهلاك الطاقة في عملية الفصل بالتناضح العكسي خلال العقود الماضية. المصدر: Elimelech and Phillip (2011)

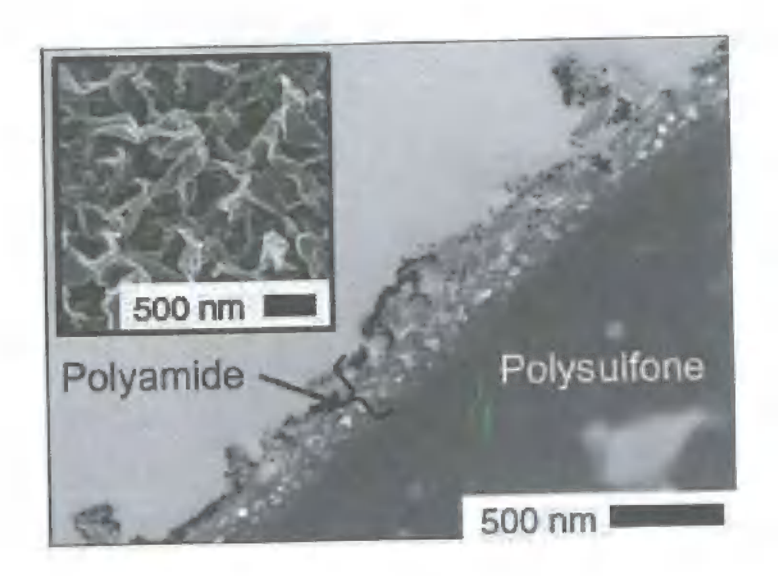
أغشية التناضح العكسي

تشكل الأغشية شبه المنفذة قلب عملية التحلية بالتناضح العكسي. كانت هذه الأغشية تصنع في البداية من أسيتات السليلوز cellulose acetate. استمر استخدام هذه الأغشية حتى استبدلت في الثمانينات بـ *الأغشية المركبة الرقيقة thin-film composite membranes*. تتكون الأغشية المركبة من طبقة رقيقة جداً من من البولي أميد polyamide (~ ١٠٠ ن م) فوق طبقة مسامية من البولي سلفون polysulfone المدعمة بنسيج من البوليستر (الشكل ١٢٧ والشكل ١٢٨). الطبقة البولي أميد العلوية هي المسئولة عن *رفض الأملاح salt rejection* والسماح بمرور الماء النقي. تصل نفاذية الأغشية المركبة إلى ٣.٥ × ١٠P-١٢P مP٣Pم.P-٢P.يا.ثP-١P (3.5 × 10P-12P mP.3..mP-2..Pa.sP-1P) P122F،P١٩٧ وتستطيع "رفض" من ٩٩.٦ - ٩٩.٨% من الأملاح الذائبة في ماء البحر.



الشكل ١٢٧: تكوين الغشاء شبه المنفذ.

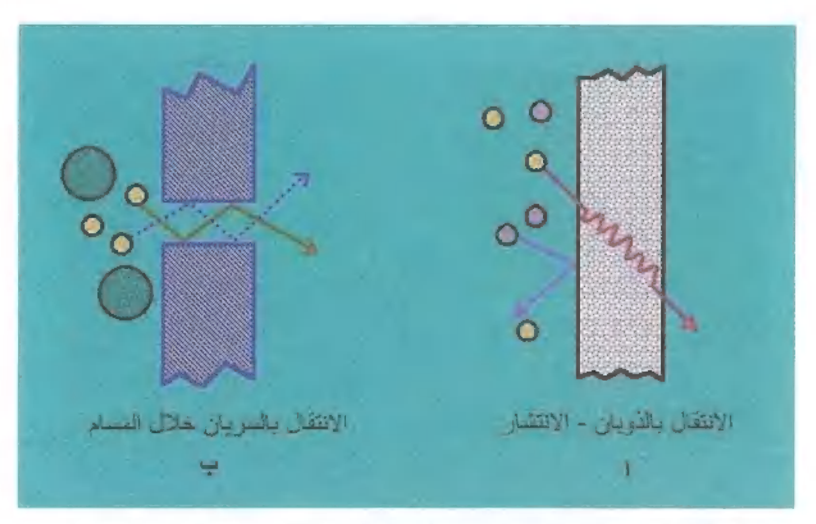
[١٩٧] تقاس نفاذية الأغشية بحجم المياه بالمتر المكعب (م^{3}) التي تمر عبر كل متر مربع (م$^{-2}$) من الأغشية شبه المنفذة في كل ثانية (ث$^{-1}$) عند ضخها تحت ضغط مقداره واحد باسكال (با)، *والباسكال Pascal* هو الوحدة الدولية لقياس الضغط.



الشكل ١٢٨: صورة مجهرية لطبقتي البولي أميد والبولي سلفون.

الجدير بالذكر أن طبقة البولي أميد شبه المنفذة ليست مسامية. لذلك تُفسر قدرتها على فصل الماء عن الأملاح الذائبة اعتماداً على *نظرية الذوبان - الانتشار* *solution-diffusion theory*. وفقاً لهذه النظرية "يذوب" الماء والأملاح في الغشاء شبه المنفذ، ثم ينتقلان بـ *الانتشار diffusion* خلاله (الشكل ١٢٩). ويحدث فصل الماء عن الأملاح نتيجة للتباين في سرعتي الذوبان والانتشار لكلاهما خلال هذا النوع من الأغشية.

يعيب الأغشية المركبة أنها عرضة للتحشف (الحياتي وغير الحياتي) الذي يقلل من كفاءتها في التحلية. يمكن تقليل التحشف أو منعه بإضافة الكلور أو غيره من *العوامل المؤكسدة* *oxidizing agents* إلى مياه التغذية. ولأن هذه الكيماويات تفسد الأغشية المركبة، يجب إزالتها قبيل مرحلة الفصل.



الشكل ١٢٩: آليات الانتقال عبر الأغشية: (ا) بالذوبان. الانتشار في الأغشية غير المسامية؛ (ب) بالسريان خلال المسام في الأغشية المسامية.

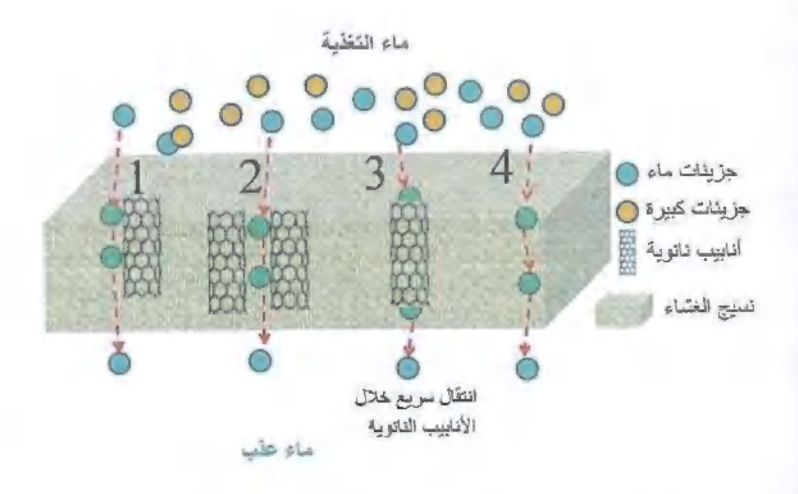
نالت حديثاً *الأغشية فائقة النفاذية ultrahigh permeability membranes* الكثير من الاهتمام كبديل محتمل للأغشية المركبة الرقيقة. الفكرة من وراء هذا الاهتمام هي أن زيادة نفاذية الأغشية يخفض من الضغط المطلوب لدفع المياه خلالها، ومن ثم خفض الطاقة المستخدمة في عملية التحلية (الشكل ١٣٠).

من الأمثلة الواعدة للأغشية فائقة النفاذية ما يعرف بسم *أغشية أنابيب الكربون النانوية المصطفة aligned carbon nanotube membranes*. يصنع هذا النوع من الأغشية بدمج *أنابيب نانوية مصطفة من الكربون aligned carbon nanotubes* في *نسيج الغشاء membrane matrix* (الشكل ١٣١). يمكن أن تصل النفاذية في هذه الأغشية إلى ثلاثة أو أربعة أضعافها في الأغشية المركبة الرقيقة التقليدية.P١٩٨P123F

[١٩٨] أنظر (2008) Corry.



الشكل ١٣٠: رسم تخطيطي يوضح مزايا الأغشية فائقة النفاذية.



الشكل ١٣١: المسارات الممكنة لانتقال الماء خلال اغشية أنابيب الكربون النانوية.

المصدر: Li et al. (2014)

الخصائص المثالية لأغشية التناضح العكسي

أفضل أغشية التناضح العكسي هي التي تتمتع بدرجة عالية من الخصائص الأساسية التالية: *الانتقائية selectivity*، *النفاذية permeability*، *مقاومة التحشف fouling resistance*، و*المتانة durability*.

الانتقائية: القدرة على السماح بمرور الماء النقي ورفض الأملاح الذائبة فيه، وتقاس بنسبة الأملاح التي لا تستطيع المرور عبر الغشاء (*رفض الأملاح salt rejection*). وبالطبع فإن الرفض الأعلى للأملاح يعني الحصول على مياه أنقى.

النفاذية: السماح بمرور كميات كبيرة من الماء النقي عبر الغشاء (إفاضات عالية)، وتقاس بكمية المياه النقية (باللتر) التي تمر عبر وحدة مساحة (متر مربع) من الغشاء في خلال وحدة زمن (ساعة). النفاذية الأعلى تعنى خفض في الطاقة المطلوبة لدفع ماء التغذية، وبالتالي خفض تكلفة المياه المنتجة.

مقاومة التحشف: تعني كفاءة أعلى وعمراً أطول للأغشية، احتياجاً أقل للمعالجة السابقة ولصيانة وحدات الأغشية، ومن ثم تكاليف اقتصادية وبيئية أقل لعملية التحلية.

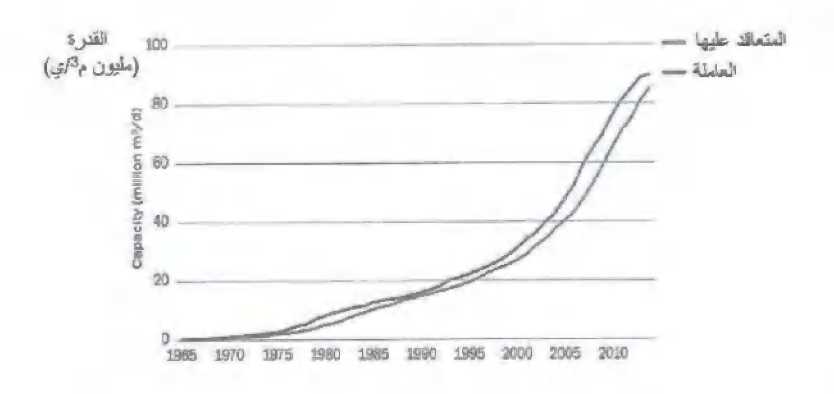
الثبات: ويقصد به المقدرة على تحمل الضغوطات العالية والكيماويات المستخدمة في عمليات التحلية (مثل الكلور وغيره من العوامل المؤكسدة) لفترة طويلة، أي زيادة عمر الأغشية الإنتاجي.

الملاءمة للاستخدام الصناعي: أي يمكن تصنيعها بمقاييس كبيرة على شكل وحدات تحلية.

هذا بالإضافة إلى عدم احتياجها لمعالجات سابقة خاصة أوصيانة مستمرة، وبالطبع الأسعار الاقتصادية والمعتدلة. الجدير بالملاحظة هو أن هذه الخصائص قد تتعارض مع بعضها البعض.

١٣. مستقبل التحلية

لقد نمت منشآت تحلية المياه بشكل متسارع في العقود الأربعة الماضية (الشكل ١٣٢). وقد وصل عددها في العالم إلى ١٨ ٤٢٦ محطة في منتصف ٢٠١٥. تنتج هذه المحطات أكثر من ٨٦.٨ مليون متر مكعب من المياه المحلاة يوميا. ويعتمد الآن ـ جزئياً أو كلياً ـ على المياه المحلاة أكثر من ٣٠٠ مليون نسمة في ١٥٠ دولة.P124F[١٩٩]



الشكل ١٣٢: السعة العالمية المتراكمة على التحلية (عاملة ومتعاقد عليها) ١٩٦٥-٢٠١٤. المصدر: IDA (2014)

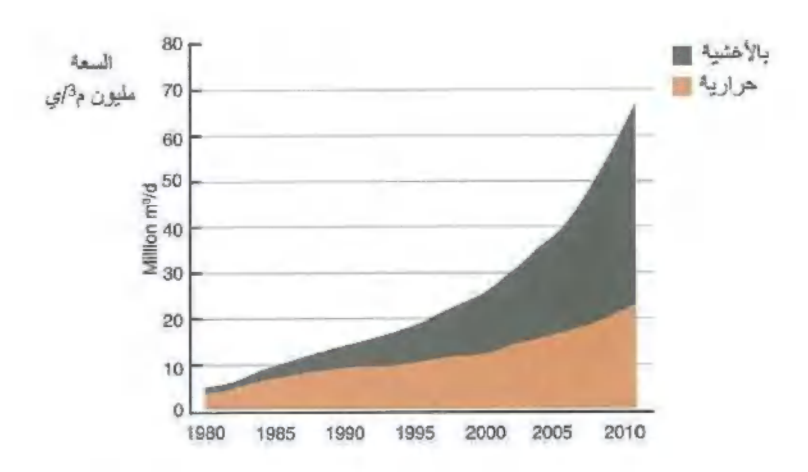
لقد انخفضت تكلفة التحلية كثيراً خلال العقود الستة التي انقضت منذ بداية استخدامها على نطاق صناعي في أواخر خمسينات القرن الماضي، وأصبحت التحلية خياراً قابلاً للتطبيق في مناطق متباينة من العالم.

يعزي الباحثون انخفاض تكلفة التحلية إلى عاملين رئيسيين: (١) التحسينات العديدة التي أدخلت على تقنيات التحلية، وخاصة تلك التي خفضت من استهلاك الطاقة؛ و(٢) زيادة حجم (سعة) محطات التحلية الأحدث إنشاء.

[١٩٩] أنظر IDA (2016).

شجع الانخفاض الهائل في تكلفة التحلية، خاصة بالتناضح العكسي، دولاً كثيرة على اللجوء للتحلية لتوفير المياه العذبة للاستعمالات المنزلية والصناعية، وحتى للأغراض الزراعية في بعض الدول مثل إسبانيا.P125F[٢٠٠]

تعد التحلية بالتناضح العكسي الطريقة الأكثر استخداماً على مستوى العالم منذ العام ٢٠٠٩ (راجع الشكل ٤٠)، ويتوقع لها أن تظل كذلك في المستقبل المنظور (الشكل ١٣٣). يبدو أن الطلب على التحلية الحرارية سيظل ينمو في دول الخليج، حيث تحظى عمليات التقطير الحراري بقبول واسع هناك. ويتوقع أن يتغير التوجه في المشروعات الجديدة في هذه الدول صوب التقطير متعدد التأثير (لا التقطير اللحظي السائد حاليا).P126F[٢٠١]P تظهر بعض الدراسات اقتراب تكلفة الوحدة المنتجة بالطرق الحرارية في الوقت الراهن من تلك المنتجة بالتناضح العكسي (الشكل ١٣٤).



الشكل ١٣٣: نمو تقنيات التحلية بالأغشية على حساب التحلية الحرارية. المصدر: Kucera (2014)

---

[٢٠٠] أنظر Maurel (2006).

[٢٠١] أنظر Ghaffour et al. (2013).

تتباين الآراء العلمية حول آفاق التحلية من الناحيتين التقنية والاقتصادية، بل قد تتعارض أحيانا.P۲۰۲P127F

في مقال شامل عن مستقبل تحلية ماء البحر، ناقش المؤلفان "مَناتشَم اِلمَلتش Menachem Elimelech" و"وليَم فِلِب William Phillip" (١) فرص خفض الطاقة التي تستهلكها عمليات التحلية، (٢) دور المواد المتقدمة والتقنيات المبتكرة في تحسين كفاءة هذه العمليات، و(٣) مدى استدامة التحلية كحل تقني للعجز في المياه العذبة.P۲۰۳P128F

يرى الباحثان أن الطاقة التي تستخدمها أفضل أنظمة التناضح العكسي المتوفرة حالياً خلال "مرحلة الفصل" في تحلية ماء البحر لا تزيد عن ضعفي الطاقة الأدنى نظرياً (نحو ٢ كوس/مP۳Pم عند استخلاص ٥٠%)، وهي أعلى بنسبة ٢٥% فقط عن *الطاقة الأدنى عملياً practical minimum energy* (١.٥٦ كوس/مP۳Pم).P۲۰٤P129F ويعتقدان أن أفضل وسيلة لخفض الطاقة المستخدمة في التحلية بالتناضح العكسي هو تطوير *أغشية مقاومة للتحشف والعوامل المؤكسدة fouling- and oxidant-resistant membranes*؛ إذ يحقق ذلك المنافع الاقتصادية والبيئية التالية:

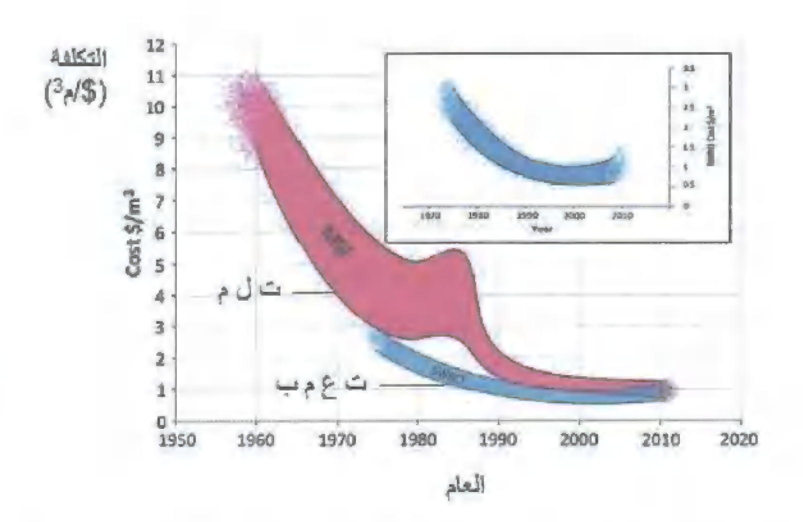
- زيادة كفاءة الأغشية؛
- تقليل استخدام كيماويات التنظيف؛
- وخفض الطاقة المستخدمة في المعالجة السابقة.

---

[٢٠٢] قد يرجع جزء كبير من هذا التباين إلى اختلاف تاريخ البحث.

[٢٠٣] أنظر Elimelech & Phillip (2011).

[٢٠٤] لا يمكن النزول بالطاقة المستخدمة في مرحلة الفصل عن هذا الحد في التصميم المستخدم حاليا.



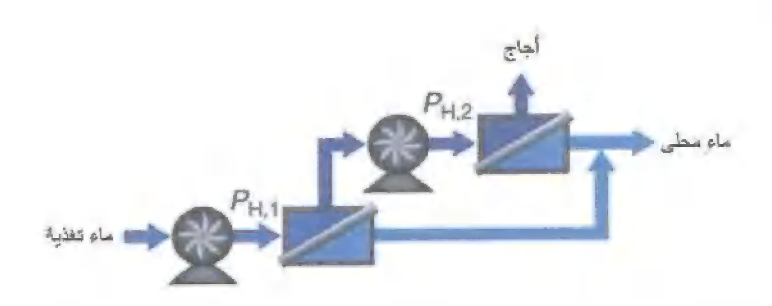
الشكل ١٣٤: اتجاهات تكلفة وحدة المياه بالتناضح العكسي والتقطير اللحظي متعدد المراحل. المصدر: Ghaffour et al. (2013)

في التصميم الشائع لمحطات التناضح العكسي، كما يبين المقال، يجرى ضخ كل ماء التغذية بمضخة واحدة، ومن ثم فصل الماء عن الأملاح على مرة واحدة، فيما يعرف بال *تشغيل على مرحلة واحدة one-stage operation* (راجع الشكل ١٢١). يمكن خفض الطاقة المستخدمة في عملية الفصل بالأغشية لو تمت هذه العملية على عدة مراحل، كما يتضح من المثال التالي.P٢٠٥P130F يستخدم التصميم المبين في الشكل ١٣٥ مضختين، ويتم الفصل فيه على مرحلتين (في وحدتي أغشية على التوالي). تتم مرحلة الفصل الأولى عند ضغط أقل، ومن ثم نحصل على استخلاص أقل. يرفع ضغط ماء البحر المركز الخارج من هذه المرحلة بواسطة مضخة ثانية، ويمرر إلى وحدة أغشية ثانية للحصول في النهاية على نسبة الاستخلاص المطلوبة. بهذه الطريقة يستخدم الضغط الأعلى (*P*RH,2R) مع كمية مياه أقل (مقارنة مع الفصل في وحدة أو على مرحلة واحدة)، ومن ثم ينخفض مقدار الطاقة الإجمالية المستخدمة. ويعتقد الباحثان أن الخفض في الطاقة المستخدمة في حالة الفصل على مراحل لن يعادل الزيادة في التكلفة الرأسمالية نتيجة تكاليف إنشاء المراحل الإضافية.

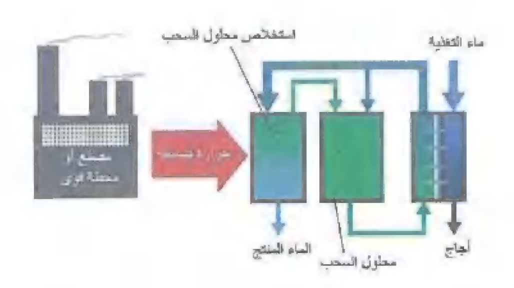
[٢٠٥] المرجع السابق

لا يتوقف البحث عن طرق وتقنيات جديدة للتحلية تكون أكفأ في استخدام الطاقة. إحدى مزايا تقنية التناضح الأمامي الناشئة هي إمكانية استخدامها للحرارة المفقودة أو *منخفضة الدرجة low-grade heat*، ومن ثم خفض التكاليف النهائية لعملية التحلية (الشكل ١٣٦). لا تزال هذه التقنية في مراحل تطورها الأولى، وتواجهها عدة صعوبات فنية عليها أن تتجاوزها حتى يجرى استخدامها على نطاق صناعي.

يتوقع بعض الباحثين أن تنخفض أسعار المياه المحلاة في السنوات المقبلة لأسباب متعددة: أسعار النفط الخام المتقلبة، التقلبات في أسعار صرف العملات، والزيادات المتوقعة في أسعار الأغشية.

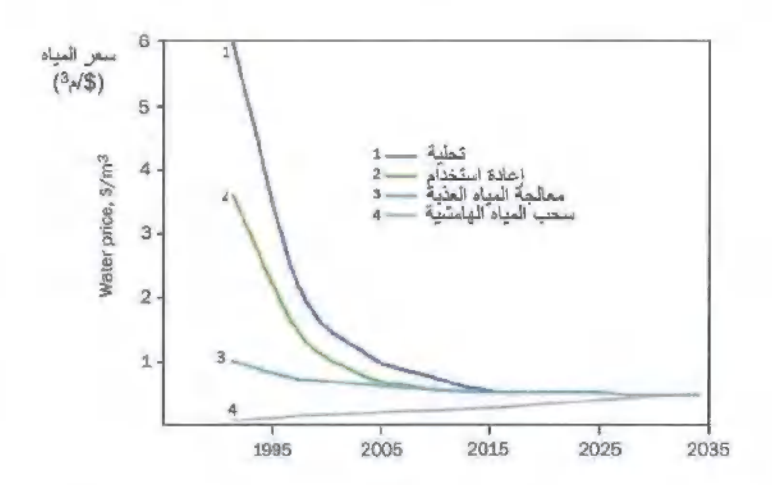


الشكل ١٣٥: رسم تخطيطي لعملية الفصل بالأغشية على مرحلتين. المصدر: Elimelech & Phillip (2011)



الشكل ١٣٦: استخدام الحرارة المفقودة كمصدر طاقة للتحلية بالتناضح الأمامي.
المصدر: Elimelech & Phillip (2011)

في المقابل، يتوقع البعض الآخر استمرار انخفاض تكاليف التحلية وتقاربها مع تكاليف إنتاج المياه العذبة من المصادر التقليدية (الشكل ١٣٧). على سبيل المثال، توقع "فوتشكوف Voutchkov" في ٢٠١٠ أن ينخفض استهلاك الطاقة في محطات تحلية ماء البحر بالتناضح العكسي بنسبة ٤٠ - ٥٠% من خلال التحسينات في جودة الأغشية، زيادة إنتاجيتها، وإطالة عمرها الإنتاجي (يتراوح حالياً ما بين خمسة وسبعة سنوات).P131F[٢٠٦]



الشكل ١٣٧: أسعار المياه (تاريخية ومتوقعة) حسب مصدرها في الولايات المتحدة.
المصدر: Lattemann et al. (2010)

يرى فريق ثالث - أكثر حذراً - أن هناك قوى تعمل على زيادة تكاليف التحلية وأخرى تعمل على خفضها. يتوقع هذا الفريق زيادة تكاليف التحلية في المستقبل القريب أو على الأقل عدم انخفاضها بنفس المعدل السابق، وذلك بسبب الارتفاع السريع في تكاليف المعدات، المواد الخام، والطاقة بالإضافة إلى زيادة صرامة القوانين والمعايير البيئية (في كاليفورنيا، قد تصل تكلفة الحصول على التصاريح اللازمة إلى ٦٠% من تكاليف المشروعات

[٢٠٦] أنظر Voutchkov (2010).

الكبيرة).P٢٠٧P132F يدعم هذا الفريق رأيه بالبيانات التي تشير إلى حدوث ارتفاع في تكاليف التحلية بالتناضح العكسي منذ العام ٢٠٠٤ (الشكل ١٣٨).

يبدو أن بعض التوقعات السابقة بنمو سوق التحلية كانت مفعمة في التفاؤل؛ ففي حين توقعت إحدى الدراسات نمو السعة العالمية إلى نحو ١١٥ مليون مP٣P/يوم بحلول ٢٠١٥ (الشكل ١٣٩)،P٢٠٨P133F بلغت هذه السعة وفقاً لتقديرات الجمعية الدولية للتحلية نحو ٨٦.٨ مليون مP٣P/يوم.

يثير الهبوط الحاد في أسعار النفط الخام منذ منتصف ٢٠١٤ (الشكل ١٤٠) سؤالاً هاماً حول أثر ذلك على سوق التحلية. هنا تتعدد الآراء أيضا. يتوقع البعض أن يؤدي ذلك إلى واحد أو أكثر مما يلي:

- انخفاض أسعار المياه المحلاة،
- عودة التحلية الحرارية إلى الصدارة من جديد؛
- إعاقة مجهودات البحث والتطوير في مجال التحلية منخفضة الطاقة والتحلية المتجددة.

في المقابل لا يعتقد بعض الخبراء حدوث ذلك في المستقبل القريب، خاصة في بلد مثل المملكة المتحدة، للأسباب التالية:

- أسعار المياه محددة قانونياً (نظامياً) في معظم البلاد (مثل المملكة المتحدة، حيث لا يتم تغييرها إلا كل خمس سنوات بعد مراجعة شاملة لكل التكاليف والاستثمارات المطلوبة لتوفير خدمات المياه والصرف الصحي)؛
- أسعار الطاقة المستخدمة في محطات التحلية أقل كثيراً من تكاليفها الحقيقية لأنها مدعمة بشكل كبير؛

---

[٢٠٧] أنظر Gaffour et al. (2013).

[٢٠٨] أنظر Zotalis et al. (2014).

- لا يوجد دليل قوي على أن هبوط أسعار النفط الخام سوف يستمر لأكثر من سنة أو سنتين أخرتين، والتغيير في الخطط الاستراتيجية للتحلية لا يتم إلا بناء على تغيرات واضحة وطويلة المدى في "بيئة الأعمال"؛
- يحتاج تصميم محطات التحلية الحرارية الجديدة، تمويلها، إنشاؤها، وتشغيلها من ٣ - ٥ سنوات؛P134F[٢٠٩]
- تستهلك التحلية الحرارية طاقة أعلى مما تستهلكه التحلية بالتناضح العكسي؛
- يجب ألا تسمح اعتبارات التنمية المستدامة أن يكون سعر الطاقة هو المعيار الأساسي لتوجهات سوق التحلية.

بغض النظر عن التباين في التقديرات والتوقعات الخاصة بتكاليف التحلية، فإن الاتجاه العام هو ناحية انخفاض تكاليف المياه المحلاة أو على الأقل تقاربها مع تكاليف المياه العذبة المنتجة بالطرق التقليدية.P[٢١٠]P135F هناك أيضاً دول كثيرة لم تعد مواردها المائية التقليدية تكفي لمقابلة احتياجاتها المتزايدة من المياه العذبة، وتعتبر التحلية لهذه الدول مصدراً غير محدود (عمليا) ومضموناً للمياه العذبة.

يتوقع أن تنمو قدرات التحلية في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا سريعاً من ٢١ مليون متر مكعب يومياً في ٢٠٠٧ إلى ١١٠ مليون متر مكعب يومياً بحلول ٢٠٣٠ (٧٠% منها في السعودية، الإمارات، الكويت، الجزائر، وليبيا).P[٢١١]P136F وسوف يسهم ذلك في ارتفاع استخدام الطاقة في المنطقة، إذ يتوقع أن ترتفع الكهرباء المطلوبة سنوياً للتحلية إلى ١٢٢ ت و س (تريليون وات. ساعة) بحلول ٢٠٣٠ (أي ما يعادل ثلاثة أضعاف الكهرباء المطلوبة في ٢٠٠٧).P[٢١٢]P137F

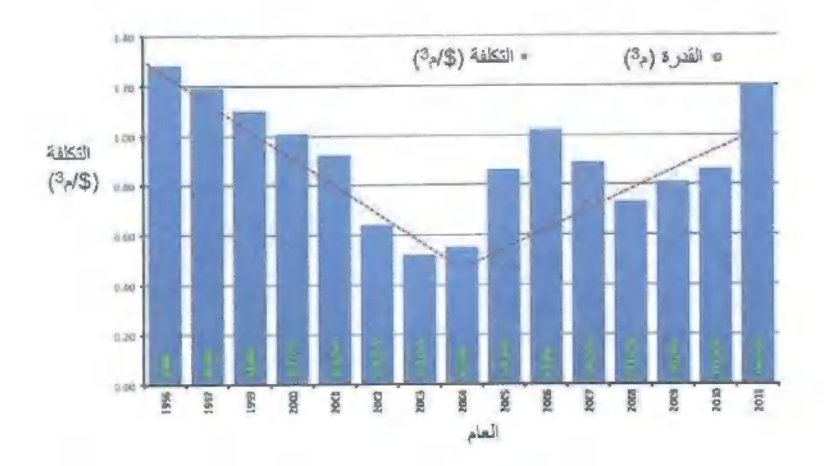
---

[٢٠٩] يشير بعض الباحثين إلى قدرة المقاولين حاليا على تنفيذ مشروعات التقطير اللحظي خلال فترة تقترب من سنة واحدة (أنظر (Ghaffour et al. (2013).

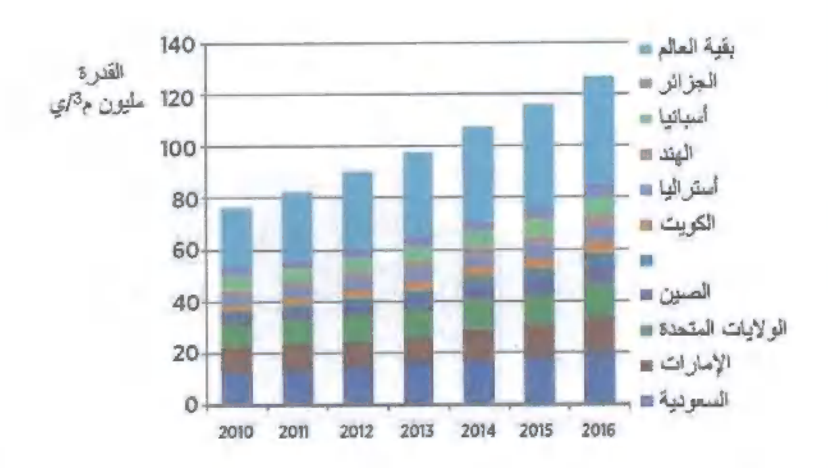
[٢١٠] يقول "توم برانكراتز Tom Pankratz"، مستشار تحلية ومحرر "تقرير مياه التحلية Water Desalination Report"، نشرة تجارية أسبوعية، أن الألف جالون من المياه العذبة من التحلية تكلف المستهلك الأمريكي ما بين ٢,٥$ - ٥$، مقارنة بـ ٢$ للمياه العذبة التقليدية.

[٢١١] أنظر (Isaka (2012.

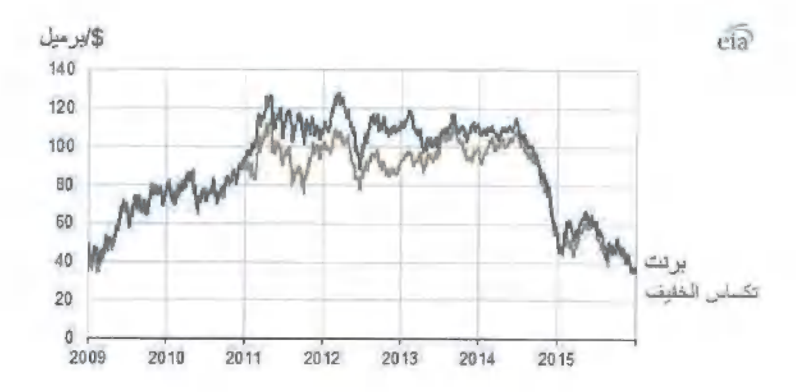
[٢١٢] أنظر (IEA (2009.



الشكل ١٣٨: تكاليف المياه الكلية لمحطات تحلية بالتناضح العكسي عاملة ومتعاقد عليها (متوسط التكاليف ومتوسط القدرة). المصدر: Ghaffour et al. (2013)

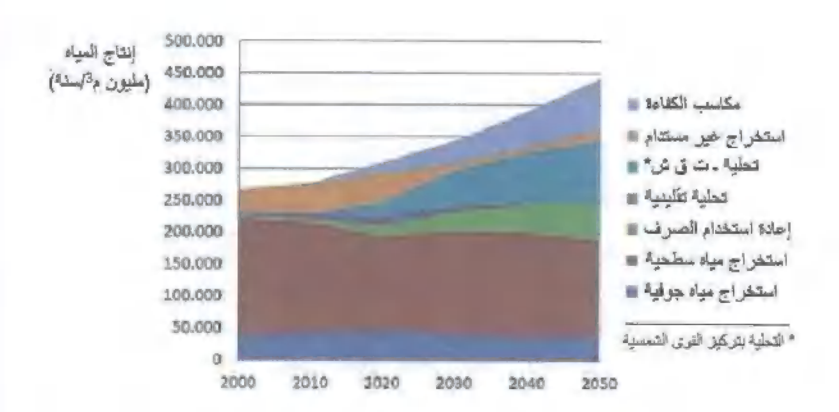


الشكل ١٣٩: قدرات التحلية العالمية المنشأة، ٢٠١٠-٢٠١٦. المصدر: Zotalis et al. (2014)



الشكل ١٤٠: الأسعار اليومية للنفط الخام. المصدر: EIA

تتوقع دراسة لمعهد الفضاء الألماني (DLR) أن تصبح التحلية المعتمدة على الكهرباء الشمسية المتمركزة مصدراً رئيسياً لإنتاج المياه في الشاشا، أي ما يمثل ١٦% من إجمالي إنتاج المياه في ٢٠٣٠ و٢٣% في ٢٠٥٠ (الشكل ١٤١).



الشكل ١٤١: سيناريوهات الطلب على المياه في الشاشا، ٢٠٠٠ - ٢٠٥٠.

المصدر: Trieb et al. (2011)

يبدو أن التحلية سوف تكون مصيرية لمصرالتي تواجه عجزاً مائياً خطيراً نتيجة للنمو السكاني والاقتصادي،P٢١٣P138F ولم يعد من الممكن تلبية الطلب المتزايد على المياه من موارد نهر النيل.P٢١٤P139F يتوقع أن تصل احتياجات مصر المائية بحلول عام ٢٠٢٥ إلى ١٣٠ مليار (بليون) مP٣P/سنة (> ٨٠% منها للاستخدامات الزراعية) بينما تبقى مواردها المائية التقليدية عند ٧٣ مليار (بليون) مP٣P/سنة، وهذا يشكل بوضوح عجزاً مائياً هائلاً.P٢١٥P140F

أخيرا، هناك توجه عالمي لإشراك القطاع الخاص بشكل كبير في تمويل وإدارة مشاريع التحلية الجديدة.P٢١٦P141F

في ضوء كل ذلك، يتوقع استمرار نمو سوق التحلية لعدة سنوات مقبلة، على الأقل في الدول العربية ذات الدخول العالية والمتوسطة.

---

[٢١٣] أنظر Isaka (2012).

[٢١٤] أنظر Shakweer & Yousef (2011).

[٢١٥] المرجع السابق

[٢١٦] أنظر Ghaffour et al. (2013).

المصادر المراجع

المصادر والمراجع

المراجع العربية

البورصة (٢٠١٦). "هايفلوكس" تتفاوض مع تحالف بنكي دولي لتدبير تمويلات دولارية لمشروعها بالسخنة. *البورصة*، ٩ مارس.

إليشا ليندر (٢٠٠٥). رهبة البحر لدى البشر، في *البحر والتاريخ* (تحرير إ إ رايس، ترجمة عاطف أحمد)، عالم المعرفة ٤١٣. المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الصفاة، الكويت.

أنطوني لافتون (٢٠٠٥). الموارد البحرية: من أيام القدماء حتى اليوم، في *البحر والتاريخ* (تحرير إ إ رايس، ترجمة ع أحمد)، سلسلة عالم المعرفة ٤١٣. المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الصفاة، الكويت.

حسن الشريف (٢٠١١). برامج الطاقة النووية في البلدان العربية. *البيئة والتنمية* عدد ١٥٨.
37TUhttp://www.afedmag.com/web/ala3dadAlSabiaSections-details.aspx?id=208&issue=&type=2&catU37T [accessed 25.9.2016]

سامر مخيمر وخالد حجازي (٢٠١٦). *أزمة المياه في المنطقة العربية: الحقائق والبدائل الممكنة* (سلسلة عالم المعرفة ٢٠٩). المجلس الوطني للثقافة والفنون والآداب، الصفاة، الكويت.

شريف قنديل (٢٠٠٦). أوزوريس *وجلجامش*. دار الشروق، القاهرة، مصر.

ف فريدنيك (١٩٧١). *ما هي ميكانيكا الكم*. دار مير للطباعة والنشر، موسكو، روسيا.

فرانس٢٤/رويترز (٢٠١٥). توقيع مذكرة تفاهم بشأن الطاقة النووية بين السعودية وكوريا الجنوبية. فرانس٢٤، باريس، فرنسا.

هشام الزيات (٢٠١٠). *الإدارة البيئية: الجوهر والمفاهيم الأساسية*. مؤسسة زايد للبيئة، دبي، الإمارات العربية المتحدة.

المراجع الأجنبية

M Abou Rayan, B Djebedjian, and I Khaled (2004). Evaluation of the effectiveness and performance of desalination equipment in Egypt. *Eighth International Water Technology Conference, IWTC8*, Alexandria, Egypt. 37TU https://www.academia.edu/2087837/EVALUATION_OF_THE_EFFECTIVENESS_AND_PERFORMANCE_OF_DESALINATION_EQUIPMENT_IN_EGYPTU37T [accessed 30.8.2016]

ACSAD and BGR (2005). *Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the Arab Region, Phase II Draft Final Report.* Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands and the German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (unpublished).

AHT (2009). *Identification and Removal of Bottlenecks for Extended Wastewater for Irrigation or for Other Purposes—Summary Report.* Advanced Human Technologies Group AG, EUROMED, and the European Investment Bank.

A Alawadhi (1999). Privatization of the power and desalination industry in the Gulf region-Bahrain experience. *Desalination* 123: 101-107.

A Al-Karaghouli, D Renne, and L L Kazmerski (2009). Solar and wind for water desalination in the Arab regions. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13(9): 2397–2407. 2407.

Ali A. Al-Karaghouli and L.L. Kazmerski (2011). Renewable Energy Opportunities in *Water Desalination, Desalination, Trends and Technologies,* Michael Schorr (Ed.). InTech, Rijeka, Croatia. 37TUhttp://www.intechopen.com/books/desalination-trends-and-technologies/renewable-energy-opportunitiesin-water-desalination U37T[accessed 30.8.2016]

A L Alldredge, U Passow, and B E Logan (1993). The abundance and significance of a class of large, transparent organic particles in the ocean. *Deep-Sea Research* 40: 1131-1140.

Y. Al-Fenadi (2001). Cloud Seeding Experiments in Arab Countries: History and Results. National Meteorological Centre,Tripoli, Libya.

W K Al-Zubari (2001). Impacts of groundwater over-exploitation on desertification of soils in Bahrain—A case study (1956–1992). *Proceedings of Regional Aquifer Systems in Arid Zones—Managing Non-renewable Resources International Conference,* 20–24 November, Tripoli, Libya. http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001270/127080e.pdf

W K Al-Zubari (2008). Integrated groundwater resources management in the GCC countries: A review. *Proceedings of the Water Science and Technology Association Eighth Gulf Water Conference: Water in the GCC, Towards an Optimal Planning and Economic Perspective,* 2–6 March, Manama, Bahrain.

W Arras, N Ghaffour, and A Hamou (2009). Performance evaluation of BWRO desalination plant – a case study. *Desalination* 235: 170-178.

Y Arsano (2007). Ethiopia and the Nile: Dilemmas of national and regional hydropolitics. PhD Dissertation, University of Zurich, Zurich, Switzerland.

Australian Government, National Water Commission (2008). Emerging trends in desalination: a review. *Waterlines Report Series* 9. 37TUhttp://www.nwc.gov.au/__data/assets/pdf_file/0009/11007/Waterlines_-_Trends_in_Desalination_-_REPLACE_2.pdfU37T [accessed 27.8.2016]

AWC (2009). MENA/Arab Countries Regional Document for the 5th World Water Forum, 20–22 March, Istanbul, Turkey. Arab Water Council, Cairo, Egypt.

AWWA (2011). *Desalination of Seawater*. American Water Works Association, Denver, CO, USA.

L Awerbuch (undated). Hybrid desalination: The best of both worlds? In *Water and Wastewater International*. PennWell Corporation, Tulsa, OK, USA. 37TUhttp://www.waterworld.com/water-and-wastewater-international.htmlU37T [accessed 21.10.2016]

A Batisha (2007). Water desalination industry in Egypt. *Proceedings of the Eleventh International Water Technology Conference*, IWTC11, 15-18 March pp. 337-349. Sharm El-Sheikh, Egypt.

A K Biswas (2002). Aswan Dam revisited: The benefits of a much-maligned dam. *Development & Cooperation* 6: 95-97.

K Bithas and P Kalimeris (2016). *Revisiting the Energy Development Link: Evidence from the 20th Century for Knowledge-based and Developing Economies*. Springer, Cham, Switzerland.

O K Buros (2000). *The ABC of Desalting*. International Desalination Association (IDA), Topsfield, MA, USA.

37TUhttp://www.water.ca.gov/pubs/surfacewater/abcs_of_desalting/abcs_of_desalting.pdfU37T [accessed 27.8.2016]

L M Camacho, L Dumée, J Zhang, J-d Li, JJ Gomez, M Duke, and S Gray (2013). Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications: A review. Water 5:94-196. 37TUhttp://www.mdpi.com/2073-4441/5/1/94/pdf U37T [accessed 30.8.2016]

M T Chaibi and A M El-Nashar (2009). Solar thermal processes, In *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*, A Cipollina, G Micale, and L Rizzuti (eds). Springer, Heidelberg, Germany.

R Choukr-Allah (2010). Wastewater treatment and reuse. In *Arab Water: Sustainable Management of a Scarce Resource*, M El-Ashri, N Saab, and B Zeiton (eds). Arab Forum for Environment and Development, Beirut, Lebanon.

R Clayton (2015). *Desalination for Water Supply: A Review of Current Knowledge*. Foundation of Water Research, Bucks, UK. 37TUhttp://www.fwr.org/desal.pdfU37T [accessed: 26.8.2016]

R O Collins (1990). *The Waters of the Nile: Hydropolitics and the Jonglei Canal, 1900-1988*. Clarendon Press, Oxford, UK.

R O Collins (2006). As-Sudd Al-Ali revisited. Unpublished article.

M Conway (2008). Desalination is the Solution to Water Shortages. *RedOrbit* 2 May. 37TUhttp://www.redorbit.com/news/science/1367352/desalination_is_the_solution_to_water_shortages/U37T [accessed 30.9.2016]

CORDIS (2003). Milos Geothermal Energy Driving ORC Turbo generator and Seawater Desalination Plant. EC, Brussels, Belgium. 37TUhttp://cordis.europa.eu/project/rcn/57624_en.htmlU37T [accessed 26.8.2016]

Corry (2008). Designing Carbon Nanotube Membranes for Efficient Water Desalination. *Journal of Physical Chemistry B* 112: 1427-1434.

DHI (2013). *Providing Safe Drinking Water with the Sun.* DHI Group, Hørsholm, Denmark. 37TUhttp://www.dhigroup.com/upload/publications/scribd/WaterStillar_Project_Reference_Flyers.pdfU37T [accessed 5.10.2016].

A A Delyannis and E A Delyannis (1974). *Water Desalting* (8P[th]P Edition). Springer, Berlin, Germany.

Dietrich Consulting Group: http://www.dietrichcg.com/

DLR (2007). *AQUA-CSP: Concentrating Solar Power for Seawater Desalination.* Institute of Engineering Thermodynamics, Stuttgart, German Aerospace Centre (DLR), Germany. 37TUhttp://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/aqua-csp/AQUA-CSP-Full-Report-Final.pdfU37T

A Droubi , I Jnad, and M Al Sibaii (2006). ACSAD activity in the field of water resources management and rainwater harvesting. Arab Center for the Study of Arid Zones and Dry Lands (ACSAD), Damascus. Syria. http://gwadi.org/sites/gwadi.org/files/RegionalDroubi.pdf [accessed 4 May 2017]

U Ebensperger, P Isley (2005). *Review of the Current State of Desalination*, Working Paper 2005–2008. Environmental Policy Group at the Andrew Young School of Policy Studies, New York, NY, USA. 37TUhttp://www.issuelab.org/resources/4717/4717.pdfU37T [accessed 30.8.2016]

Egypt Oil&Gas Web Portal (2015). World's Largest Solar Desalination Plant for Saudi. Egypt Oil&Gas, Cairo, Egypt. 37TUhttp://www.egyptoil-gas.com/news/worlds-largest-solar-desalination-plant-for-saudi/U37T

M Elimelech and W A. Phillip (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science* 333: 712-717. 37TUhttps://albertsk.files.wordpress.com/2012/08/science-2011-elimelech-712-71.pdfU37T [accessed 28.8.2016]

EPA (1975). Preliminary investigation of effects on the environment of boron, indium, nickel, selenium, tin, vanadium and their compounds. Vol. 1. Boron. US *Environmental Protection Agency Rep. 56/2-75-005A.* 37TUhttps://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe?User=ANONYMOUS&Password=anonymous&Client=EPA&SearchBack=ZyActionL&SortMethod=h&SortMethod=-&MaximumDocuments=15&Display=hpfr&ImageQuality=r85g16%2Fr85g16%2Fx150y150g16%2Fi500&DefSeekPage=x&ZyAction=ZyActionS&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&Docs=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&File=&SeekPage=&Back=ZyActionL&BackDesc=Contents+page&MaximumPages=1&ZyEntry=0&TocRestrict=n&SearchMethod=2&Time=&ZyActionS=+Search+--%3E+&Query=560275005A+&FuzzyDegree=0&Index=2011+Thru+2015&Ind

ex=1995+Thru+1999&Index=1981+Thru+1985&Index=2006+Thru+2010&Index=1991+Thru+1994&Index=1976+Thru+1980&Index=2000+Thru+2005&Index=1986+Thru+1990&Index=Prior+to+1976&Index=Hardcopy+Publications&IndexPresets=entryU37T [accessed 27.8.2016]

EU (2008). *ADIRA Handbook: A Guide to Autonomous Desalination System Concepts*. Euro-Mediterranean Regional Programme for Water Management (MEDA), European Commission, Brussels, Belgium. 37TUhttp://wrri.nmsu.edu/conf/conf11/2008_adira_handbook.pdfU37T. [accessed 27.8.2016]

FAO (2008). *Irrigation in the Middle East region in figures – AQUASTAT Survey 2008*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. 37TUftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i0936e/i0936e00.pdfU37T [accessed 6.9.2016]

R Feyman, R B Leighton, and M Sands (1963). *The Feyman Lectures on Physics*, Vol 1. Addison-Wesley, Reading, MA, USA.

Foundation for Water Research (2015). *Desalination for Water Supply: A Review of Current Knowledge*. Foundation for Water Research, Marlow, UK.

R Fouquet (2008). *Health, Power, and Light: Revolution in Energy Services*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.

R Fouquet (2011). A brief history of energy, in J Evans and L C Hunt (eds), *International Handbook on the Economics of Energy*. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.

T Freyberg (2016). Small-scale desalination plants to help develop Sinai, Egypt. *WWi magazine*, June 8. 37TUhttp://www.waterworld.com/articles/wwi/2016/06/small-scale-desalination-plants-to-help-redevelop-sinai-egypt.htmlU37T [accessed 27.8.2016]

C. Fritzmann, J. Lowenberg, T. Wintgens, and T. Melin (2007). State-of-the-Art of Reverse Osmosis Desalination. *Desalination* 216: 1-76.

N Georgescu-Roegen (1984). Feasible recipes versus viable technologies. *Atlantic Economic Journal* **12**(1): 21-31.

H Gernsback and H W Secor (1916). The Utilization of the Sun's Energy. *Electrical Experimenter* III (35/11). 37TUhttp://peswiki.com/reprint:teslas-solar-ideasU37T [accessed 2.10.2016]

N Ghaffour, T M Missimer, and G L Amy (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination* 309: 197-207.

E Ghiazza and A M Ferro (2007). IWPP projects: A challenge for the optimization of combined power/water plants. *IDA World Congress on Desalination and Water Reuse*, 21-26 October, Maspalomas, Spain. 37TUwww.fisiait.com/pubblicazioni/26/Ghiazza_10.pdf U 37T[accessed 6.10.2016]

G Goldenberg (1986). *Ethiopian Studies: Proceedings of the Sixth International conference*, Tel-Aviv, 14-17 April 1980. A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

V G Gude, N Nirmalakhandan, and S Deng (2010). Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable and Sustainable Energy Review* 14(9): 641-2654.

A Kazini (2008). Cloud seeding experiment has thundering success. *Gulf News*, 8 May. http://gulfnews.com/news/uae/environment/cloud-seeding-experiment-has-thundering-success-1.104086

Khaleej News (2016). 550 liters of water used per day by a UAE resident. March 22. http://www.khaleejtimes.com/550-litres-of-water-used-per-day-by-a-uae-resident [accessed 19.6.2017]

M F Hamoda (2001). Desalination and water resource management in Kuwait. *Desalination* 138(1-3): 385-393.

D Hasson and O Bendrihem (2006). Modeling remineralization of desalinated water by limestone dissolution. *Desalination* 190: 189-200. 37TUhttp://gwri-ic.technion.ac.il/pdf/Professors/DAVID_HASSON/11.pdfU37T [accessed 30.8.2016]

C Heather, P H Gleick, and G Wolff (2006). *Desalination, with a Grain of Salt.* Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security, Oakland, CA, USA.
37TUhttp://pacinst.org/app/uploads/2015/01/desalination-grain-of-salt.pdfU37T [accessed: 27.8.2016]

R Heinberg (2011). *The End of Growth: Adapting to our New Economic Reality.* New Society Publishers, Gabriola Island, BC, Canada.

IAEA (1996). *Potential for Nuclear Desalination as a Source of Low Cost Potable Water in North Africa.* International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria. 37TUhttp://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_0917_scr.pdfU37T [accessed 26.9.2016]

IDA (2016). *Desalination by the Numbers.* International Desalination Association, Topsfield, MA, USA. 37TUhttp://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/U37T [accessed: 28.8.2016]

IEA (2009). *World Energy Outlook 2009.* International Energy Agency (IEA), Paris, France.
37TUwww.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2009/WEO2009.pdf U37T[accessed 2.9.2016]

IWRA (2016). The Grand Ethiopian Renaissance Dam (GERD): A Catalyst for Cooperation on the Nile (Policy Briefing No. 5). IWRA, Nanterre Cedex, France. http://www.google.com.eg/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjY39iu0o3VAhWEYVAKHST4DpMQFgggMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iwra.org%2Fdoc%2FPB-N5_web.pdf&usg=AFQjCNEA8YsNJu3oeLQI0y_MixF3jNci9A [accessed 16.7.2017]

M Isaka (2012). Water Desalination using Renewable Energy: Technology Brief. International Renewable Energy Agency (IRENA), Masdar, Abu Dhabi, UAE. 37TUhttps://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20I12%20Water-Desalination.pdfU37T

W S Jevons (1865). *The Coal Question: an Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable exhaustion of our coal-mines.* Macmillan, Britain.

S A Kalogirou (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy & Combustion Science* **31**: 242-281.
37TUhttp://membrane.ustc.edu.cn/paper/pdf/Seawater%20desalination%20using%20renewable%20energy%20sources.pdfU37T [accessed 27.8.2016]

I C Karagiannis and P G Soldatos (2008). Water desalination cost literature: review and assessment. *Desalination* 223: 448-456
37TUhttps://www.academia.edu/1229534/Water_desalination_cost_literature_review_and_assessmentU37T [accessed 30.8.2016]

I Khamis and P K Tewari (2007). An overview of global activities in nuclear desalination. *Proceddings of International Conference on Non-Electrical Applications of Nuclear Power*, 16-19 April, pp 381-393, Oarai, Japan.
37TUhttp://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P_1354_CD/PDF/P_1354.pdfU37T [accessed 25.9.2016]

H Khordagui (1992). Conceptual approach to selection of a control measure for residual chlorine discharge in Kuwait bay. *Environmental Management* 16(3): 309-316.

H J Krishna (2004). Introduction to Desalination Technologies. Texas Water Development Board, Austin, TX, USA.
37TUhttp://texaswater.tamu.edu/readings/desal/introtodesal.pdfU37T [accessed: 26.8.2016].

J Kucera (2014). Introduction to desalination, In *Desalination: Water from Water*, J Kucera (Ed). Scrivener Publishing, Beverly, MA, USA.

S Latteman and T Höpner (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220: 1-15. http://www.desaline.com/articoli/8958.pdf [accessed 11.7.2017]

Lenntech: http://www.lenntech.com/

S Li, G Liao, Z Liu, Y Pan, Q Wu, Y Weng, X Zhang, Z Yang and O K C Tsuid (2014). Enhanced water flux in vertically aligned carbon nanotube arrays and polyethersulfone composite membrane. *Journal of Materials Chemistry A* 2(31): 12171-12176. 37TUhttp://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2014/ta/c4ta02119cU37T [accessed 30.8.2016]

A Lucas (2006). *Wind, Water, and Work: Ancient and Medieval Milling Technology*. Brill Academic Publishers, the Netherlands.

Ludwig, H. (2010). Energy consumption of reverse osmosis seawater desalination — possibilities for its optimization in design and operation of SWRO plants. *Desalination and Water Treatment* 13: 3-5. 37TUhttp://www.deswater.com/DWT_abstracts/vol_13/13_2010_13.pdfU37T [accessed 30.8.2016].

A N Mabrouk, A S Nafey, and H E S Fath (2010). Steam, electricity and water costs evaluation of power-desalination co-generation plants. *Desalination and Water Treatment* 22(1-3):56-64. 37TUhttps://www.researchgate.net/publication/254226281_Steam_electrici

ty_and_water_costs_evaluation_of_power_desalination_co-generation_plantsU37T [accessed 30.8.2016]

Malkawi, S. 2003. Water Authority of Jordan. Paper presented at the *Regional Consultation to Review National Priorities and Action Plans for Wastewater Re-use and Management*, 20–22 October, Amman, Jordan.

A. Maurel (2006). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres (2P^eP Édition). Tec & Doc Lavoisier, France.

J R McCutcheon, R L McGinnisb, and M Elimelecha (2005). A novel ammonium-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process. *Desalination* 174: 1-11.

J R McCutcheon and N N Bui (2014). Forward osmosis, in *Desalination: Water from Water*, J Kucera (Ed.). Scrivener Publishing, Beverly, MA, USA.

J R McNeil (2000). *Something New under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World* (the Global Century Series). WW Norton and Company, New York, NY, USA.

B M Misra and I Khamis (2014). A review of desalination plants coupled to nuclear power stations, In *Desalination: Water from Water*, J Kucera (Ed.). Scrivener Publishing, Beverly, MA, USA.

M Mott-Smith (1964). *The Concept of Energy Simply Explained*. Dover Publications, New York, NY, USA.

M B Olivera (2004). Science popularization as a study subject. *Proceedings of the 8P*thP *international Conference on Public Communication of Science and technology*, 3-6 June, Bercelona, Spain.

G Parkinson (2015). Saudis to build world's first large scale solar powered desalination plant. *RnewEconomy.com* 22 January. RenewEconomy, Neutral Bay, NSW, Australia. 37TUhttp://reneweconomy.com.au/2015/saudis-build-worlds-first-large-scale-solar-powered-desalination-plant-82903U37T [accessed: 26.8.2016]

L Pauling (1970). *General Chemistry*. Dover Publications, New York, NY, USA.

PWA (2000). Gaza Coastal Aquifer Management Program. *Integrated Aquifer Management Plan*, Task 3, Volume 1. Palestinian Water Authority, Ramallah, Palestine.

PennWell Corporation (2007-2016). *IWPP Financing – Cashing in on Middle Eastern Power and Water*. Power Engineering International, Tulsa, OK, USA. 37TUhttp://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-15/issue-5/features/iwpp-financing-cashing-in-on-middle-eastern-power-and-water.htmlU37T [accessed 9.10.2016]

G Raluy, L Serra, and J Uche (2006). Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies. *Energy* 31(13): 2361-2372.

A H Røsberg (2014). Egypt, Ethiopia, and the Nile: Understanding Egypt´s refusal to renegotiate the 1929 and 1959 agreements concerning rights and allocations of the Nile. Master's Thesis, University of Oslo, Oslo, Sweeden. *https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/40296/Rsberg_Master.pdf?...7* [accessed 15.6.2017]

L G Reynolds (1983). The spread of economic growth to the third world: 1850-1980. *Journal of Economic Literature* **21**(3): 941-980.

RSB (undated). Independent Water and Power Producers. Regulation & Supervision Bureau, Abu Dhabi, UAE.

UNDP (2013). *Water Governance in the Arab Region.* United Nations Development Program, New York, NY, USA.

UNESCO (2012). *Managing Water under Uncertainty and Risk: The United Nations World Water Development Report 4.* UNESCO, Paris.

US National Research Council (2004). *Review of the Desalination and Water Purification Roadmap.* National Academies Press, Washington, DC, USA.37TUhttp://www.nap.edu/catalog/10912.htmlU37T [accessed: 24.8.2016].

URS Australia (2002). Introduction to desalination technologies in Australia : A summary report prepared for Agriculture, Fisheries & Forestry – Australia. AFFA, Canberra, Australia.
37TUhttp//catalogue.nla.gov.au/Record/3967107U37T [accessed: 24.8.2016]

H Sadallah (2014). Effectiveness of water supply disinfection system in Um Al-Nasser village as a marginal rural community. MSc Thesis, Islamic University at Gaza, Gaza, Palestine. http://library.iugaza.edu.ps/thesis/111726.pdf [accessed 19.6.2017]

I M Sefton (2004) Understanding Energy, in *Proceedings of 11th Biennial Science Teachers' Workshop*, 17 and 18 June, The University of Sydney,

Australia.
37TUhttp://sydney.edu.au/science/uniserve_science/school/curric/stage6/phys/stw2004/sefton1.pdfU 37T[accessed: 26.11.2016]

R M Shakweer and R M Yousef (2011). Egypt's Desalination Technology Roadmap 2030. Center for Future Studies, Egyptian Cabinet's Information and Decision Support Center (IDSC), Cairo, Egypt. 37TUhttp://water.dwz-kairo.de/sites/default/files/EFP-Brief-No.-253_Desalination-Technology-Roadmap-2030.pdfU37T [accessed 2.9.2016]

A Shams El Din and R Mohammed (1998). Kinetics of reaction between hydrogen peroxide and hypochlorite. *Desalination* 115: 145-153.

SUSRIS (undated). *Independent Water and Power Project (IWPP).* Saudi-US Information Service, SUSRIS Project, Nashville, Tennessee, US. 37TUhttp://susris.com/glossary/independent-water-and-power-project-iwpp/U37T [accessed 7.10.2016]

SWCC (Saline water Conversion Corporation): http://www.swcc.gov.sa

M S Tayie (2017). The hydropolitics of the Nile River Basin. In *The Nile River*, pp 599-654, A M Negm (Ed). Springer, Cham, Switzerland.

The Saudi Arabian Water Environment Association (2013). Basic design of desalination processes workshop in *Water Arabia 2013 Conference*, 4-6 Feb, Al-Khobar, Saudi Arabia.
37TUhttp://www.sawea.org/pdf/waterarabia2013/Workshops/BASIC_DESIGN_OF_DESALINATION_PROCESS.pdfU37T [accessed 30.8.2016]

F Trieb, M Moser, and T Fichter (2011). MENA Regional Water Outlook Desalination Using Renewable Energy: Overview of DLR work within the MENA Regional Water Outlook study. *DLR Workshop*, 22-23 February, Muscat, Oman.
37TUhttp://elib.dlr.de/72591/1/Workshop_Oman_Final_DLR.pdfU37T. [accessed 2.9.2016]

T Tvedt (2004).The River Nile in the Age of the British - Political Ecology and the Quest for Economic Power. I B Tauris & Co Ltd, London, UK.

E A Wallis Budge (1907). *The Egyptian Sûdân, Its History and Monuments.* Kegan Paul, Trench, Trübner & Co., London.
https://archive.org/stream/egyptiansudanits02budg#page/484/mode/2up [accessed 9.5.2017]

Watereuse Association Desalination Committee (2012). *Seawater Desalination Costs* (White Paper). Watereuse Association, Alexandria, VA, USA.
37TUhttps://watereuse.org/wp-content/uploads/2015/10/WateReuse_Desal_Cost_White_Paper.pdfU37T [accessed 30.9.2016]

B Walker (2015). China's desalination plans could thwart "war on pollution". *ChinaDialogue.net* 4 Feb, chinadialogue, London, UK.
37TUhttps://www.chinadialogue.net/article/show/single/en/7696-China-s-desalination-plans-could-thwart-war-on-pollution-U37T [accessed 28.8.2016]

WHO (2006). Total dissolved solids in drinking water. *WHO/SDE/WSH/03.04/16.* World Health Organization, Geneva, Switzerland.

37TUhttp://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/tds.pdfU37T [accessed 24.8.2016]

WHO (1984). *Guidelines for Drinking Water Quality. Volume 2: Health Criteria and Other Supporting Information.*World Health Organisation, Geneva, Switzerland.

World Bank (2007). *Making the Most of Scarcity: Accountability for Better Water Management in the Middle East and North Africa.* MENA Development Report. World Bank,Washington, DC, USA.
http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/COUNTRIES/MENAEXT/
[accessed 17.6.2017]

World Bank (2012). *Renewable Energy Desalination: An Emerging Solution to Close the Water Gap in the Middle East and North Africa.* The World Bank, Washington, DC, USA.

E A Wrigely (1988). The limit to growth: Malthus and the classical economists. *Population and Development Review* 14: 30-48.

WWi (2016). $500 Desalination/power plant helps Hyflux enter Egypt market. *WWi magazie,* March, 15.
37TUhttp://www.waterworld.com/articles/wwi/2016/03/500m-desalination-power-plant-helps-hyflux-enters-egypt-market.htmlU37T
[accessed 27.8.2016]

G L M von Medeazza (2005). Artificial kidneys for the soil - solving the problem of salinization of the soil and underground water. *Desalination* 185: 57-70.

N Voutchkov (2011) How much does seawater desalination cost? *International Training Program on Seawater Desalination*, 1-4 February, Lordos Beach Hotel, Larnaca, Cyprus. 37TUhttp://slideplayer.com/slide/9237810/ U37T[accessed 22.9.2016]

J R Ziolkowska (2015). Is desalination affordable?—Regional cost and price analysis. *Water Resour Management* 29: 1385–1397. 37TUhttp://link.springer.com/article/10.1007/s11269-014-0901-yU37T [accessed 27.8.2016]

K Zotalis, E G Dialynas, N Mamassis, and A N Angelakis (2014). Desalination Technologies: Hellenic Experience. *Water* 6: 1134-1150. 37TUhttp://www.mdpi.com/2073-4441/6/5/1134/pdfU 37T[accessed 28.8.2016]



الملاحق

ملحق ١: مقدمة متعددة الزوايا عن الطاقة

التحلية والطاقة

لقد عرفنا أن عمليات التحلية تستخدم كميات كبيرة من الطاقة، وهذا يجعلها عالية التكلفة ماليأً وبيئياً. وتهدف أبحاث التطوير في مجال التحلية بشكل أو بآخر إلى خفض تلك الاحتياجات. ويهدف هذا الملحق إلى تعريف/تذكير القارئ غير المتخصص في العلوم الفيزيائية أوالهندسية بالمفاهيم الأساسية لتلك الطاقة.

لابد أن الأنسان قد أدرك منذ وجوده على الأرض حاجته إلى "الطاقة". وبمرور الزمن تبدلت **المصادر** التي يستمد منها الإنسان هذه الطاقة: من قواه البدنية إلى "طاقة الذرة"، مروراً بقدرة حيواناته المستأنسة، الرياح والمياه الجارية، الطاقة الكامنة في الحطب والفحم والنفط والغاز الطبيعي، وحديثاً الطاقة الشمسية. فما هي هذه الطاقة؟ وماهي أنواعها، خصائصها، أشكالها، ومصادرها؟

الطاقة في أحاديثنا اليومية

تتردد كلمة الطاقة في أحاديثنا اليومية كثيرا: "لكل إنسان طاقة"، "الطاقة الإيجابية والطاقة السلبية"، "مشروب الطاقة"، "ترشيد الطاقة"، "الطاقة النظيفة"... تشمل مرادفات الطاقة في اللغة العربية كلمات مثل "جهد"، "وسْع"، "حَول"، و"حاجة". فيما يلي بعض أقوال المشاهير التي تتضمن كلمة الطاقة:

التمني يستهلك نفس الطاقة التي يستهلكها التخطيط.

— اليناور روزفلت

القوميات لا تريد أن تتمازج، وكل منها تريد أن تمضي في طريقها عملاً بقانون حفظ الطاقة.
— ألبرت أينشتاين

سوف يتغير التاريخ فقط متى استطعنا استخدام طاقة الحب، تماماً كما نستخدم طاقة الريح، البحار، والذرة.

— باولو كويلو

يختلف الفيزيائيون فيما بينهم حول ما إذا كانت هذه المعاني المتداولة للكلمة يمكن أن تساعدنا في إدراك المفهوم العلمي للطاقة.P ويبدو أن بعض الفيزيائيين المحدثين قد عزف تماماً عن محاولة تبسيط مفاهيم الفيزياء الحديثة بأمثلة من خبراتنا اليومية المباشرة، بعد أن هزت ولادة *ميكانيكا الكم quantum mechanics* في مطلع القرن العشرين،بمفاهيمها الغريبة وقوانينها الثورية الجديدة أركان الفيزياء الكلاسيكية العتيقة.P143F[٢١٧] يقول "ريتشارد فينمان Richard Feynman"، الحائز لجائزة نوبل الشهيرة في الفيزياء "الطاقة ليست شيئاً يمكن إدراكه وإنما كمية يلزم لحسابها استخدام مجموعة شاملة من القواعد."P142F[٢١٨]

قانون نيوتن الأول (قانون *القصور الذاتي*): يظل الجسم في حالته الثابتة (إما السكون التام أو الحركة U<u>في خط مستقيم بسرعة ثابتة</u>)P148F[٢١٩]P ما لم تؤثر عليه *قوة* خارجية تغير من حالته.

---

[٢١٧] أنظر المرجع التالي لمعالجة علمية وتاريخية مبسطة لهذه الأحداث: ف ريدنيك (١٩٧١).

[٢١٨] أنظر (1963) Feyman.

[٢١٩] كتب الفيلسوف "أرسطو Aristotle" (٣٨٤ - ٣٢٢ قم) أن جميع الأجسام تصل في النهاية إلى حالة طبيعية من السكون. وانتظر العالم حتى أدرك "جاليليو Galileo" (١٥٦٤ - ١٦٤٢)، بعد أرسطو بقرون عديدة، أن الأجسام التي لا تتعرض لتأثيرات من الأجسام الأخرى تستمر في حركتها دون تغيير.

نحو تعريف علمي للطاقة

اللغة العلمية لغة دقيقة وموجزة؛ فلكل مصطلح علمي معنى محدد تحديداً صارما، كما يندر أن توجد مرادفات للـ "مفردات" العلمية الأصيلة، إذ يشار إلى كل *مفهوم علمي scientific concept* بمصطلح (term) واحد في معظم الأحيان.

تعتبر *الطاقة energy* مفهوم محوري في العلوم الطبيعية،P٢٢٠P144F لكنها أيضاً مفهوم "مائع" ومتطور يصعب تعريفه بدقه في عبارات موجزة. يقول البروفسور "إيان سفتن Ian Sefton" . أستاذ الفيزياء بـ "جامعة سدني الأسترالية University of Sydney" . يقول "لا يوجد في الحقيقةً مفهوم فريد، مطلق، أو عالمي للطاقة، وليس لها تعريف بسيط"، ويرى أن الحرص على إعطاء الأفكار العلمية تعاريف محددة هو أحد مظاهر "التعليم التلقيني".P٢٢١P145F في المقابل هناك من يفضل أن نبدأ بتعريف عملي مرتجل يساعدنا على إدراك المفهوم العلمي الصعب، ثم تغييره بعد أن يتضح لنا المعنى إلى التعريف الأكثرَ دقّة. وهذه هي المقاربة التي اتبعناها عند كتابة هذا الملحق عن الطاقة، فهكذا تتطور في الواقع معارفنا العلمية عن الكون.

لدى معظمنا إدراك حدسي (أو بديهي) للطاقة؛ فنحن نعرف أننا نحتاجها لانجاز بعض الأعمال اليومية مثل المشي، رفع كوب من الشاي، تسخين بعض الماء، أو تشغيل جهاز التلفاز. مع أن هذا التوصيف يعتبر صحيحاً إلا أنه يصف في الحقيقة استخدامات الطاقة لا طبيعتها أو حتى سلوكها (مثل ما الذي يحدث لها بعد استخدامها).

سنحاول في الجزء التالي الوصول إلى "تصور عملي" للمفهوم العلمي للطاقة، متجنبين ما أمكن الخوض في مجادلات الفيزيائيين الفلسفية العميقة.P٢٢٢P146F من أجل ذلك نحتاج لمراجعة بعض المفاهيم الفيزيائية ذات الصلة، وهي تحديداً مفاهيم *القصور الذاتي inertia*، *التسارع acceleration*، *القوة force*، و*الشغل work*.

---

[٢٢٠] ربما يقابله مفهوم "النفوذ power" المحوري أيضا في العلوم الاجتماعية.

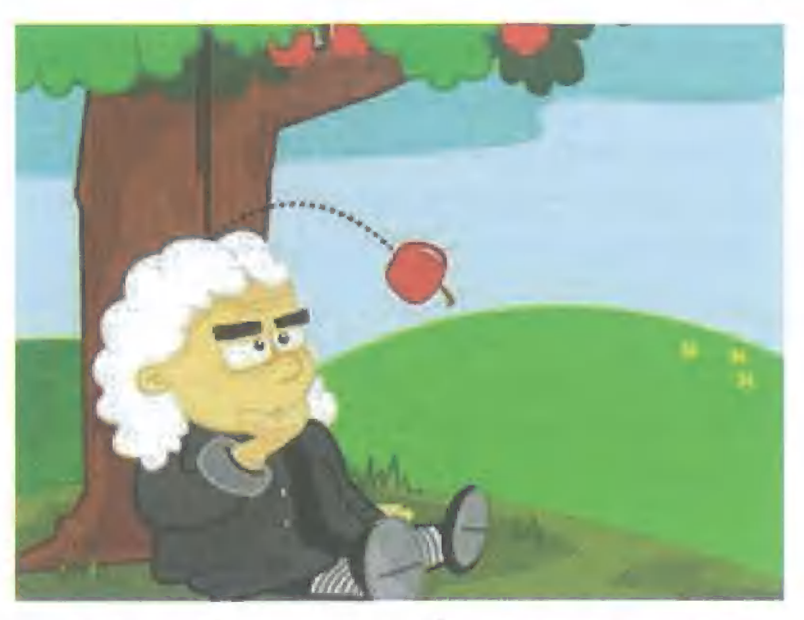
[٢٢١] أنظر Sefton (2004).

[٢٢٢] نتذكر هنا ما قاله زميل لنا ذات يوم ساخرا أنه كان يحب الموسيقى، وأراد أن ينمي معارفه العلمية عنها، فأخذ يقرأ عن *فيزياء الصوت sound physics* ليجد نفسه قد نسي تماما "موضوع الموسيقى" الذي من أجله قرأ أصلا في كتب "الفيزياء الحديثة"!

يجمع إسحاق نيوتن بين المفاهيم الثلاث الأولى ببراعة في "قوانين الحركة" الشهيرة التي حملت وخلدت اسمه:P147F[٢٢٣]

- يقصد بالقوة هنا *القوة غير المتوازنة unbalanced* . أي التي لا يقابلها قوة أخرى معادلة لها في المقدار معاكسة لها في الاتجاه.
- لدى جميع الأجسام قصور ذاتي ("مقاومة داخلية" لتغيير حالتها الحركية)، وكلما زادت كتلة الجسم زاد قصوره الذاتي.

مثال ١: تبقى التفاحة ساكنة على الشجرة طالما لم تؤثر عليها قوة غير متوازنة، لكنها تتحرك بفعل الريح وربما تسقط إذا كانت "قوة" الريح عالية (الشكل ١٤٢).

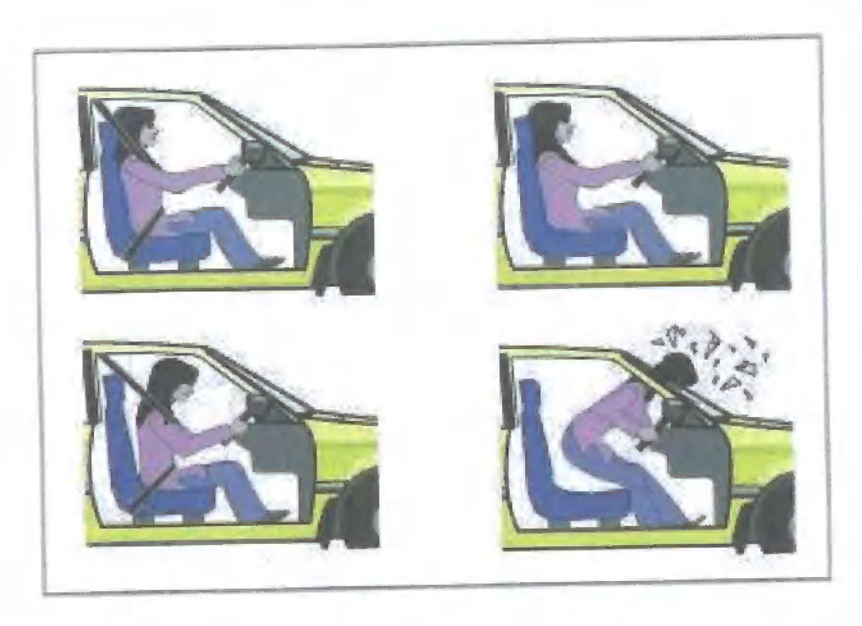


الشكل ١٤٢: التفاحة التي ألهمت نيوتن بقانون القصور الذاتي.

---

[٢٢٣] عادة ما يحاول العالم الباحث تفسير *الحقائق facts* أو *الظواهر phenomena* التي يدرسها بفكرة أو مجموعة من *الأفكار ideas* المبدئية يطلق عليها اسم *الفرضية hypothesis*. وإذا ظلت تلك الفرضية تتفق مع النتائج التجريبية التي تختبرها تحولت إلى *نظرية theory* أو *قانون law*. القانون هو عبارة موجزة (أو معادلة بلغة الرياضيات) حول الحقائق التجريبية المشهودة، مثل قوانين الحركة لنيوتن التي نناقشها هنا. أما النظرية فهي مجموعة مترابطة من الأفكار التي تفسر بعض الظواهر الطبيعية أو النتائج التجريبية، مثل نظرية *مركزية الشمس the heliocentric theory* التي تقول أن الأرض تدور حول الشمس، والتي ينسب الفضل فيها عادة إلى الفلكي البولندي "نيكولاوس كوبرنيكس Nicolaus Copericus" (١٤٧٣ - ١٥٤٣)، الذي وضعها بعد ملاحظته الطويلة لتحركات الكواكب ودراسته المستفيضة للنظريات السابقة من العصر الكلاسيكي والعالم الإسلامي.

مثال ٢: إذا ما اصطدمت سيارة مسرعة بحاجز طريق أو سيارة أخرى واقفة فإن السائق يستمر في الحركة للأمام، وقد يصطدم وجهه بعنف في زجاج سيارته إذا لم يكن رابطاً حزام الأمان كما يجب (الشكل ١٤٣).



الشكل ١٤٣: مثال من الحياة المعاصرة على قانون نيوتن الأول.

قانون نيوتن الثاني (قانون *التسارع*): إذا أثرت قوة على جسم أكسبته *تسارعاً* يتناسب طردياً مع القوة المؤثرة، وعكسياً مع *كتلة* الجسم. ويعبر عن هذا القانون رياضياً كالتالي:

$$F = ma$$

F: force القوة

m: mass الكتلة

a: acceleration التسارع

- التسارع هو تغير السرعة مع الزمن، وتسارع الجسم الساكن أو المتحرك بسرعة ثابتة يساوي الصفر.
- تعتبر السرعة والتسارع والقوة *متجهات vectors*، أي لها *مقدار magnitude* *واتجاه direction*. ويرمز للمتجهات بـ "حروف ثقيلة bold letters".
- تشير *الكتلة mass* إلى مقدار ما يحتويه الجسم من "مادة matter".
- تحتاج الأجسام ذات الكتلة الأكبر لقوة أكبر لتغيير سرعتها بنفس المقدار (حيث أن التسارع = القوة ÷ الكتلة).
- *الوحـــدات الدوليـــة SI units* للمتغيـــرات الثلاثـــة في قـــانون نيـــوتن الثـــاني هـــي كالتالي:P٢٢٤P149F التسارع = متر لكل ثانية مربعة (م/ثP٢P)، الكتلة = كيلوجرام (كج)، القوة = نيوتن Newton (ن)، حيث النيوتن الواحد هو القوة التي تعطي كتلة مقدارها كيلوجراماً واحداً تسارعاً مقداره "متراً واحداً في الثانية" كل ثانية (لاحظ أن القـــوة (ن) = الكتلـــة (كج) × التســـارع (م/ثP٢P) وفقـــاً لقـــانون نيـــوتن الثاني).P٢٢٥P150F

مثال ١: يصعب تحريك الكتلة الأكبر (أي زيادة سرعتها عن الصفر) لأن ذلك يتطلب استعمال قوة أكبر (الشكل ١٤٤).

مثال ٢: في حالة السقوط الحر (أي لا توجد مقاومة من الغلاف الجوي) من نفس الارتفاع عن سطح الأرض (أو القمر) فإن الأجسام الكبيرة (فيل مثلا) والصغيرة (ليكن أرنبا) تصل معاً إلى مستوى السطح (الشكل ١٤٥)!

---

[٢٢٤] يشار إلى وحدات القياس الدولية بالحرفين اللاتينيين "SI" اختصارا للعبارة الفرنسية " le System international d'Unites"، وتعني "النظام الدولي للوحدات".

[٢٢٥] ١ نيوتن = ١ كيلوجرام- متر لكل ثانية مربعة (كج.م/ث^{٢})



الشكل ١٤٤: تحريك الكتلة الأكبر يتطلب استعمال قوة أكبر.

التوضيح: كتلة الفيل أكبر من كتلة الأرنب، لذلك تجذب الأرض (أو يجذب القمر) الفيل بقوة أكبر. لماذا إذاً يصل الاثنان معاً إلى السطح؟ سؤال جميل، والإجابة تكمن في قانون نيوتن الثاني (قانون التسارع). وفقاً لهذا القانون فإن التسارع (**a**) يتناسب طردياً مع القوة المؤثرة (**F**) وعكسياً مع كتلة الجسم المتحرك (m):

$$a = F/m$$

وكأن الكتلة الأكبر للفيل تزيد من التسارع وتقاومه في ذات الوقت: تزيد من التسارع بشكل غير مباشر لأنها تزيد من قوة جذب الأرض (أو القمر) له (تزيد من قيمة **F**)،P151F[٢٣٦]P وتقاومه نتيجة لعلاقتها "العكسية مع التسارع (المعادلة السابقة) بحيث تبقى قيمة *تسارع الجاذبية الأرضية* *acceleration of (earth) gravity* (أو القمرية) دائماً واحدة (٩.٨ م/ث/ث للأرضية و١.٦ م/ث[٢] للقمرية).

$$a_e = 9.8\ m/s^2\ \&\ a_m = 1.6\ m/s^2$$

---

[٢٣٦] يطلق على قوة الجاذبية اسم *الوزن* *weight*.



الشكل ١٤٥: تسارع الجاذبية مقدار ثابت.

المفهوم الفيزيائي للشغل

ليس كل ما يعمله الإنسان يعتبر شغلاً بالمفهوم الفيزيائي للكلمة. مهما كان المجهود الذي يبذله الشخص في أداء عمله. فلا *شغل work* في لغة الفيزياء معنى محدد تحديداً صارماً: أن يتم التأثير على شيء بقوة معينة لمسافة ما، ومقداره هو حاصل ضرب القوة المؤثرة في المسافة التى قطعها هذا الشيء (في نفس إتجاه القوة). لنأخذ المثال التالي: لنفترض أنك تريد تحريك خزانة كتبك الكبيرة إلى اليسار قليلاً (الشكل ١٤٦). إذا نجحت في تحريكها. ولو بقيد أنملة. فقد قمت بشغل **(W)** مقداره مضروب قوتك العضلية **(F)** في *الإزاحة displacement* أو *المسافة* التي تحركتها الخزانة **(d)**.

$$W = F.d$$

أما إذا لم تنجح في تحريكها إطلاقاً فأنت لم تقم بأدنى شغل (على الخزانة) مهما تعرقت أو تعبت. نستطيع أن نقول بلغة الرياضيات "أن ما قمت به من شغل يساوي صفرا" (لأن مضروب أي قيمة في الصفر يساوي صفرا).P152F[٢٢٧]

[٢٢٧] ينظر البعض إلى *الرياضيات mathemtics* باعتبارها نوع من اللغات: لغة متخصصة دقيقة وموجزة.

W = F.0 = 0

الوحدة الدولية للشغل هي الـ "جول joule"، ويعرف بأنه الشغل الذي تقوم به قوة مقدارها نيوتن واحد عندما تحرك نقطة التأثير لمسافة متراً واحداً في إتجاه تأثير هذه القوة.

ما هي الطاقة إذاً؟

يختلف الفيزيائيون فيما بينهم عندما يتعلق الأمر بـ "التعريف الصحيح" للطاقة. هناك من يرى أنها ليست أكثر من "كيان entity" مجرد يمكن حسابه وفقاً لمجموعة من القواعد التي يعمل على اكتشافها الفيزيائيون،P[٢٢٨]P153F وأن أي تصوير آخر للطاقة لا يعد إلا تدخلاً بشرياً جزافياً قد يساعد على أو يعوق الفهم الصحيح لعلم الفيزياء.P[٢٢٩]P154F على كل حال، فإن التعريف الأكثر استخداماً في الكتب الدراسية هو "المقدرة على أداء *شغل*"، والوحدات المستخدمة للتعبير عن قيمة الطاقة هي نفسها وحدات الشغل (الجول مثلا). يعتبر هذا التعريف "مقبولاً مبدئياً" من الناحية العلمية. وسواء كان هذا التعريف دقيقاً ومفيداً أما لا،P[٢٣٠]P155F لنعرف منه على الأقل أن هناك علاقة جوهرية بين الطاقة، الشغل، والقوة.

نستطيع أيضاً أن نقول ـ دون أن نخشى لومة لائم ـ أن الطاقة ليست "شيئا" وإنما هي "حالة" (أو "ظرف") توجد عليها (أو فيه) الأشياء.

نوعان من الطاقة

يتفق الفيزيائيون ـ لحسن الحظ ـ حول وجود نوعين أساسيين من الطاقة: *الطاقة الحركية kinetic energy* و*طاقة الوضع potential energy*.

---

[٢٢٨] سنفهم مغزى هذا التعريف بعد أن نتعرف على أهم خصائص الطاقة والقوانين التي تحكم سلوكها في الكون.

[٢٢٩] أنظر Sefton (2004).

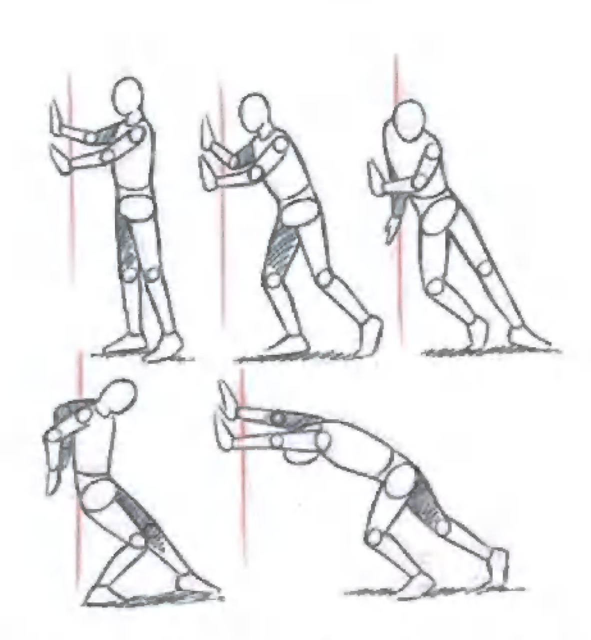
[٢٣٠] يعترض بعض الفيزيائيين على هذا التعريف الشائع لأسباب ستتضح تدريجيا فيما بعد.

الطاقة الحركية هي الطاقة التي يملكها جسم بسبب حركته. تتوقف قيمة هذه الطاقة (ER_kR) على شيئين: كتلة الجسم المتحرك (m) وسرعته (v)، وتساوي نصف حاصل ضرب كتلته في مربع سرعته:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

طاقة الوضع هي الطاقة (الكامنة) التي يكتسبها جسم ما بسبب وقوعه تحت تأثير قوة نابعة من شيء آخر (مثل جاذبية الأرض). نستطيع أن نحسب قيمة طاقة الوضع لجسم يقع على ارتفاع معين فوق سطح الأرض من حاصل ضرب كتلته (m) في تسارع الجاذبية الأرضية (g) في ارتفاعه عن الأرض (h):

$$ER_pR = mgh$$



الشكل ١٤٦: مقدار الشغل يساوى صفراً إذا لم يتحرك الجسم الذي تؤثر عليه بقوتك العضلية.

الطاقة والمادة

ينجذب أي جزء من *المادة* على الأرض إلى مركز الكرة الأرضية بفعل *قوة الجاذبية* *force of gravity*. يوصف هذا الانجذاب - كما أشرنا من قبل - بـ*الوزن* *weight*.

لقد ظن العلماء لسنوات كثيرة أن المادة والطاقة (وسنميزها مؤقتاً بـ *الطاقة الشعاعية* *radiant energy*) شيئان مختلفان جوهريا: المادة لها كتلة؛ الطاقة الشعاعية ليس لديها مثل هذه الكتلة. لقد ظل هذا هو المعتقد حتى أشار "ألبرت أينشتاين" في بداية القرن العشرين إلى أن للطاقة أيضاً كتلة، ولذلك ينجذب الضوء للمادة عبر قوة الجاذبية. وقد تحقق الفلكيون من ذلك عندما وجدوا أن الشعاع الآتي من نجم بعيد عن الأرض ينحي نحو الشمس عند مروره بالقرب منها.

كان يظن أيضاً أن "المادة لا تفنى ولا تستحدث"، وإنما يمكن فقط تحويلها من شكل لآخر. لكن اكتشاف المواد المشعة ودراسة طبيعة الإشعاع النووي بيّنا أن المادة (على الأقل جزءاً ضئيلاً منها) قد تتحول إلى طاقة شعاعية، والطاقة الشعاعية إلى مادة. وتعطينا معادلة أينشتاين الشهيرة العلاقة بين مقدار معين من الطاقة وكمية المادة التي تقابلها:

$$E = mcP^2$$

E: energy الطاقة (ج)

m: mass الكتلة (كج)

c: velocity of light سرعة الضوء (م/ث)

ولذلك يعتبر بعض العلماء أن المادة هي شكل من الطاقة.

أشكال ليست كالأشكال

معظمنا يعرف أن الطاقة تظهر بأشكال مختلفة (أو هكذا سمعنا):

- *الطاقة الحرارية thermal energy*
- *الطاقة الكيميائية chemical energy*
- *الطاقة الكهربية electrical energy*
- *طاقة الضوء light energy*
- *الطاقة النووية nuclear energy*

ونعرف أيضاً أن الطاقة تستطيع التنقل بين هذه الأشكال المختلفة والتحول من نوع لآخر:

- ترتفع حرارة بشرتنا عندما نستلقي تحت أشعة الشمس . تتحول طاقة الضوء إلى طاقة حرارية في أجسادنا.
- وعندما نلقي بشيء من فوق جرف فأنه يسقط بسرعة متزايدة . تتحول طاقة الجاذبية الوضعية إلى طاقة حركية.
- تضاء الغرفة (وترتفع حرارتها أيضا) عندما نفتح زر الإضاءة. تتحول الطاقة الكهربية إلى ضوء وحرارة.
- ندفئ أيدينا في الجو البارد بفركها معاً. تتحول الطاقة الكيميائية في عضلاتنا إلى حركة ثم إلى حرارة من خلال *الاحتكاك friction*.

يتحفظ بعض الفيزيائيين على استخدام عبارة "أشكال الطاقة forms of energy"، لأنها قد توحي بأن هناك عدة "طاقات"، وأن لهذه الطاقات خصائص مختلفة. ويفضلون استبدالها بعبارة "حاملات الطاقة carriers of energy":

باختصار: لا يعتبر التدريس حول أشكال الطاقة عدا الطاقة الحركية وطاقة الوضع - وإن لم يكن خاطئاً تماماً . لا يعتبر مفيداً أو منيراً بشكل كبير.156F[٢٣١]

متاهة التعريفات

تعريف الطاقة الأكثر انتشاراً في الكتب الدراسية هو. كما سبق وعرفنا. "المقدرة على أداء شغل". مع ذلك يتحفظ بعض الفيزيائيين على هذا التعريف أو يعترض. هناك من يراه غير كامل ويعدله إلى الآتي: "الطاقة هي خاصية للمادة يمكن تحويلها إلى شغل، حرارة، أو إشعاع. ويراه البعض غير مفيد عملياً فضلاً عن كونه غير دقيق علميا: فالطاقة هي إحدى مقاييس حالة (أو ظروف) الجسم أو "المنظومة"، والشغل لا يعني الطاقة وإنما هو *العملية* التي لاتغيرلا طاقة الجسم أو المنظومة.

لنتخلى ولو مرحلياً عن محاولة وضع تعريف دقيق ومفهوم للطاقة، ونحاول عوضاً عن ذلك أن نَعرفها ونفهمها من خلال معرفة أهم خصائصها والقوانين التي تحكم سلوكها في الكون.

خصائص الطاقة وقوانينها

تلخص قوانين "الديناميكا الحرارية (أو الحراك الحراري) thermodynamics" الأولى أهم خصائص الطاقة وسلوكها في الطبيعة.P[٢٣٢]P157F وتعتبر موضوعات الديناميكا الحرارية من الموضوعات الصعبة حتى بالنسبة لطلاب العلوم الطبيعية والهندسية، كما يتطلب فهم أصولها خلفية جيدة في الرياضيات. ولأن كتابنا هذا ليس كتاباً مدرسياً حول الديناميكا الحرارية أو الرياضيات، سنكتفي هنا بشرح مضمون هذه القوانين بلغة مبسطة.

يقول **القانون الأول للديناميكا الحرارية** (بشكل تقريبي) أن مقدار الطاقة الإجمالي يبقى دائماً كما هو. قد يتغير بين "أشكال" الطاقة المختلفة، ولكنه يبقى دائماً في مجمله ثابتا.

---

[٢٣١] أنظر (Sefton (2004: 6.

[٢٣٢] المقطع الأول (thermo) من كلمة "thermodynamics" يعني "الحرارة"؛ الثاني (dynamics) يعني "الحركة".

يطلق الفيزيائيون على هذا القانون اسم مبدأ *بقاء* أو *انحفاظ الطاقة* *conservation of energy*،[233] وتتوافق كل القوانين الفيزيائية المعروفة مع هذا المبدأ. على سبيل المثال، تتغير الطاقة الحركية للسيارة عند توقفها عند إشارة حمراء إلى حرارة (أو طاقة حرارية) بواسطة الاحتكاك. وسنجد إذا ما قمنا بحساب مقدار الطاقة الإجمالي قبل وبعد التوقف أنه ظل ثابتاً دون تغير.

ألا يبدو هذا متناقضاً مع ما نسمعه كثيراً من ضرورة "الحفاظ على الطاقة" وترشيد استخدامها؟ نأمل أن يتلاشى هذا التناقض الظاهري حالا، بعد أن نتعرف على مضمون **القانون الثاني للديناميكا الحرارية**. يقول هذا القانون أن جزءاً من الطاقة يصبح أقل فائدة بتحولها (أو انتقالها) بين الأشكال (أو الحاملات) المختلفة للطاقة. لنأخذ كمثال ما يحدث عندما تدير سيارتك لتنطلق بها إلى عملك (إذا كنت لا تفضل أو لست مضطراً لاستعمال المواصلات العامة). بداية، تكون الطاقة على "شكل" طاقة كيميائية "مخزنة" (أو بالأحرى محمولة) في الجازولين. بعد انطلاق السيارة يكون لدينا طاقة كيميائية محمولة في نواتج *احتراق* الجازولين، الطاقة الحركية للسيارة، والحرارة <u>التي تتشتت</u> بواسطة *مشعاع radiator* السيارة. يمكننا التعبير عن ذلك بلغة الرياضيات كالتالي:

$$(CE)_{before} = (CE)_{after} + (KE)_{car} + Heat$$

$(CE)_{before}$: طاقة كيميائية (قبل الانطلاق)

$(CE)_{after}$: طاقة كيميائية (بعد الانطلاق)

$(KE)_{car}$: الطاقة الحركية للسيارة

Heat: حرارة تتشتت

عندما نرفع قدمنا عن دواسة الوقود تبطئ السيارة حتى تتوقف في النهاية، وقد "تآكلت" طاقتها الحركية بالاحتكاك وتشتت على شكل حرارة. لقد بدأنا بطاقة كيميائية في وقود

---

[233] قد يبدو هذا المبدأ متناقضا مع الدعوات البيئية المتكررة للحفاظ على الطاقة، وسوف نفهم أسباب هذا التناقض الظاهري في الجزء القادم.

الجازولين وانتهينا بحفنة من الحرارة بالإضافة إلى طاقة كيميائية في نواتج الاحتراق. من الواضح أن الطاقة التي بدأنا بها كانت أفيد من تلك التي انتهينا بها. وهذا هو ما يحدث دائماً عند استعمال الطاقة (مضمون القانون الثاني للديناميكا الحرارية).

مقاييس الطاقة وأخواتها

عرفنا أن الشغل والطاقة يقاسا في نظام الوحدات الدولية بالجول، وأن الجول هو مقدار الشغل الذي تقوم به قوة مقدارها نيوتن واحد (ن) عندما تحرك نقطة التأثير لمسافة متر واحد. تبلغ قوة الجاذبية الأرضية لكيلوجرام واحد من المادة ٩.٨ ن؛ وعليه فإن الجول الواحد هو كمية الطاقة المطلوبة لرفع جسم كتلته ١٠٢ ج لارتفاع مقداره متر واحد. يمكننا أيضاً قياس هذا المقدار من الشغل (أو الطاقة اللازمة لانتاجه) بالـ *سعرات الحرارية calories*. السعر هو كمية الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة واحدة سلسيوس أو مئوية (مثلاً من ١٣.٥ إلى ١٤.٥°س)، ويعادل السعر الواحد ٤.١٨ جول.

إن الوقت اللازم لبذل كمية معينة من الشغل (أي معدل إنتاج أو استخدام الطاقة) هو عامل هام في كثير من الحالات. على سبيل المثال، قد يستطيع رجل واحد أن يحمّل عربة نقل بـ ٤٠ حجراً كتلة الواحد منها ٢٥ كيلوجراماً إذا ما رفعها حجرا تلو الآخر. لكنه لن يتمكن أبداً من رفعها دفعة واحدة (١٠٠٠ كيلوجرام) إذا ما فكر في ذلك، رغم كون الشغل المبذول في الحالتين هو متساو تقريبا. يطلق على مقدار الشغل المبذول في وحدة الزمن اسم *القدرة power*، ويجرى قياسها في النظام الدولي بالـ *وات* (و) *watt*. يعادل الوات الواحد جولاً في كل ثانية (ج/ث). وفي الحقيقة نحن نطبق مفهوم "القدرة" بشكل بديهي كثيراً في حياتنا اليومية (الشكل ١٤٧).

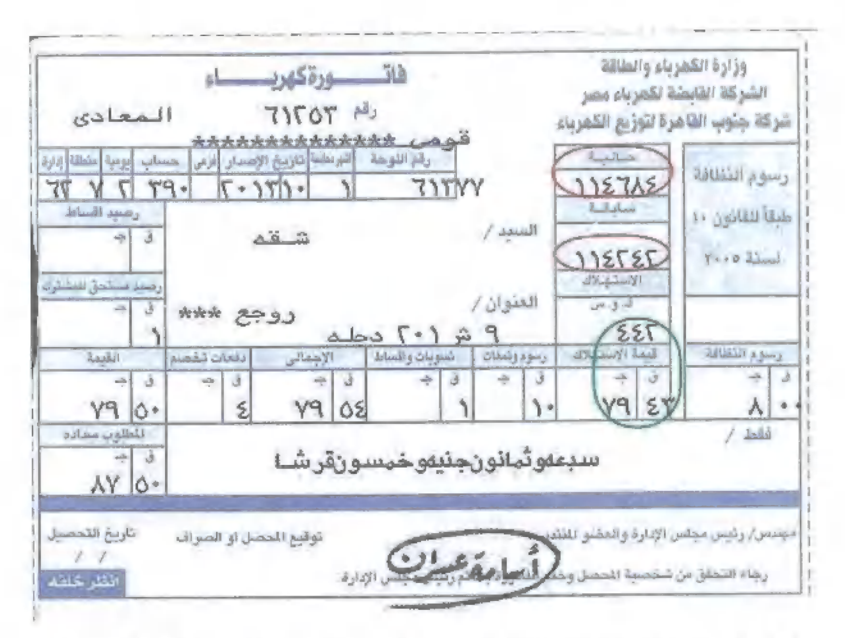


الشكل ١٤٧: الحمل الذي لا تقدر على رفعه دفعة واحدة قد تستطيع ذلك لو جزأته.

تميل شركات الكهرباء إلى حساب الطاقة المنتجة أو المستخدمة بوحدة القدرة (وات) مضروبة في فترة الانتاج أو الاستخدام. ستجد علي سبيل المثال أن استهلاكك في فاتورة الكهرباء محسوباً بال*كيلووات . ساعة* (كوس) (الشكل ١٤٨):

١ كوس = ١٠٠٠ وات لمدة ساعة = ١٠٠٠ "جول كل ثانية" × ١ ساعة

= ١٠٠٠ جول/ثانية × (٦٠ × ٦٠) ثانية = ٣٦ × ١٠ ^{٥} جول = ٣.٦ ميجاجول (مج)



وزارة الكهرباء والطاقة
الشركة القابضة لكهرباء مصر
شركة جنوب القاهرة لتوزيع الكهرباء

فاتـــــورة كهربـــــاء

رقم ٦١٣٥٣ المعادى

قومى ***************

رقم اللوحة	[illegible]	تاريخ الإصدار	فرعي	حساب	يومية	منطقة	إدارة
٦١٣٧٧	١	٢٠١٣١٠		٣٩٠	٢	٧	٦٣

رسوم النظافة طبقاً للقانون ١٠ لسنة ٢٠٠٥

حالية: ١١٤٦٨٤
سابقة: ١١٤٢٤٢
الاستهلاك ك.و.س: ٤٤٢

السيد / شـقه

العنوان / روجع *** ٩ ش ٢٠١ دجلـه

رصيد اقساط: ق | ج
رصيد مستحق للمشترك: ق ١ | ج

رسوم النظافة	قيمة الاستهلاك	رسوم ودمغات	تسويات واقساط	الإجمالي	دفعات تقسيم	القيمة
ق ٠٠ ج ٨	ق ٤٣ ج ٧٩	ق ١٠ ج	ق ١ ج	ق ٥٤ ج ٧٩	ق ٤ ج	ق ٥٠ ج ٧٩

فقط / سبعه وثمانون جنيه وخمسون قرشا

المطلوب سداده: ق ٥٠ ج ٨٧

مهندس/ رئيس مجلس الإدارة والعضو المنتدب — أسامة عسران

توقيع المحصل او الصراف

تاريخ التحصيل / /

رجاء التحقق من شخصية المحصل وختم ... رئيس مجلس الإدارة

انظر خلفه

الشكل ١٤٨: استهلاك الكهرباء محسوب بالكيلوواط. ساعة (كوس).

تقاس قدرة محطات توليد الكهرباء الحديثة بالميجاوات (مو). تبلغ قدرة أكبر محطة لتوليد الكهرباء في العالم ٢٢٥٠٠ مو، وهي محطة "سد الممرات الثلاثة Three Gorges Dam" الكهرومائية في شرق الصين (الشكل ١٤٩). أما أكبر محطة لتوليد الكهرباء من زيت النفط فهي "محطة الشعيبة لتحلية المياه المالحة وتوليد الطاقة الكهربائية" على الساحل الغربي للسعودية، والتي تنتج ٥٦٠٠ مو (الشكل ١٥٠).

يستعمل *الحصان horsepower* في بلدان كثيرة لقياس القدرة، ويمثل تقليدياً "قدرة" الحصان، أي ٧.٥ ضعف قدرة الإنسان (الشكل ١٥١).

١ حصان = ٧٤٥.٧ وات

يبذل الإنسان الطاقة بمعدل ١٠٠ وات في المتوسط (قدرة لمبة إضاءة متوسطة)، ويترواح هذا المعدل ما بين ٨٥ واتاً أثناء النوم و٨٠٠ وات أو أكثر عند ممارسته للتمارين الرياضية المكثفة.[٢٣٤]



الشكل ١٤٩: سد الممرات الثلاثة في الصين.

مشكلة الطاقة

نحن نعرف الآن أن كمية الطاقة المتاحة في الكون ثابتة لا تتغير: لا تفنى ولا تخلق من العدم، وإنما يمكن أن تتحول من شكل لآخر (أو تنتقل من شيء لآخر - كما يفضل بعض الفيزيائيين). يعتبر "مورت واكر Mort Walker" الشغل، الحرارة، وبعض أنواع الإشعاع أشكال الطاقة التي يحتاجها المجتمع، وهي التي تستخدم اليوم لإنتاج الكهرباء. لكن هذه الأشكال ليست متاحة بسهولة بعكس الطاقة الشمسية، الكيميائية، النووية، وطاقة الجاذبية (والتي يصفها "واكر" بالأشكال *البدائية primitive* للطاقة). يختصر "واكر" مشكلة الطاقة في حاجتنا إلى تحويل أشكال الطاقة المتوفرة غير الملائمة (الأشكال البدائية) إلى الأشكال

---

[٢٣٤] الكيلووات يعادل تقريبا قدرة عشرة رجال.

الأنسب والنادرة التي تحتاجها مجتمعاتنا.P٢٣٥P159F علاوة على ذلك هناك دائماً جزء من الطاقة يصبح أقل فائدة بعد استخدامها (القانون الثاني للديناميكا الحرارية).



الشكل ١٥٠: محطة الشعيبة لتحلية المياه المالحة وتوليد الطاقة الكهربائية.



الشكل ١٥١: قدرة الحصان = ٧.٥ قدرة الإنسان = ٧٤٦ وات.

[٢٣٥] أنظر Walker (undated).

الطاقة، التكنولوجيا، المجتمع، والبيئة: تاريخ مختصر

كانت الطاقة ولازالت من أهم الموارد اللازمة لتقدم المجتمعات الإنسانية ورخائها. تعتبر الشمس المصدر الأساسي للطاقة على الأرض. ولولا الشمس ما وجدت أنواع الحياة المعروفة على كوكبنا. تقوم النباتات الخضراء باستخدام الطاقة الشمسية، الماء، وثاني أوكسيد الكربون لبناء أنسجتها من خلال عملية *التمثيل الضوئي photosynthesis*. تنتقل المواد والطاقة من النبات إلى الحيوان وأخيراً إلى الإنسان من خلال *السلسلة الغذائية food chain*.

ترتبط مصادر الطاقة المتجددة بشكل مباشر أو غير مباشر بالشمس (مثل الخلايا الشمسية/الضوء. جهدية في الحالة الأولى والرياح في الثانية). أما أنواع الوقود الأحفوري التي نعتمد عليها حالياً في جميع مناحي حياتنا فقد تكونت عبر ملايين السنين من بقايا النباتات والحيوانات التي كانت تعيش في الأزمنة السحيقة.

يتناول الجزء التالي تطوراستخدام المجتمعات الإنسانية للطاقة منذ مئات آلاف السنين.

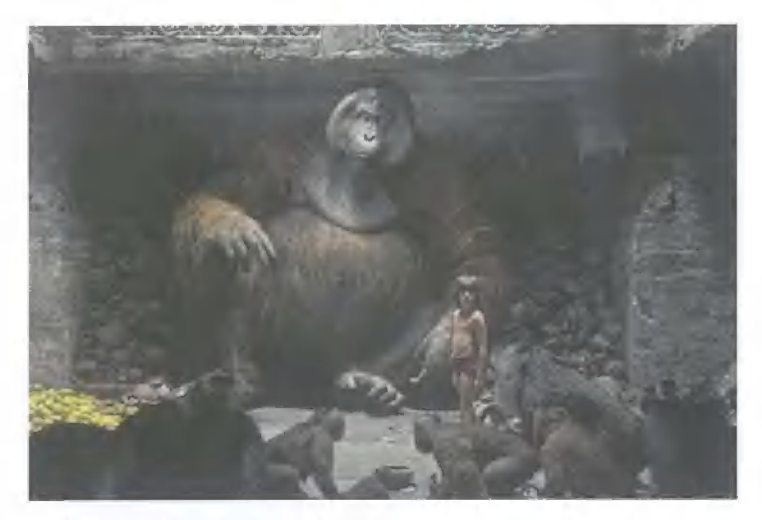
إجادة النار والزراعة: اقتصاد الطاقة العضوية

في فيلم الرسوم المتحركة "كتاب الأدغال Jungle Book" يطلب ملك القرود، الملك "لوي Louie" (الشكل ١٥٢)، من الصبي "موجلي Mowgli" الذي خطفته القرود وأحضرته إلى كبيرها . يطلب منه صنع شعلة من النار (أو "الوردة الحمراء" كما يسميها ملك القرود). ويحاول ملك القرود إغراء الصبي فيقول له أنهما بتلك الوردة الحمراء يستطيعان امتلاك الغابة بأكملها معاً.

يتفق المؤرخون والعلماء على أن إجادة الإنسان استخدام النار كانت أولى العلامات الفارقة في تطور المجتمعات البشرية. ويُشبِه الكيميائي الأمريكي "لَينوس باولنج Linus Pauling"

(١٩٠١ - ١٩٩٥)، الحاصل على جائزة نوبل في الكيمياء (١٩٥٤)، ذلك الحدث باكتشاف أسرار الطاقة النووية في منتصف القرن العشرين.P160F[٢٣٦]

يعود الانتفاع بالنار في الطهي والتدفئة باستخدام وقود *الكتلة الحياتية biomass* (وأساساً الخشب) إلى أكثر من ٤٠٠٠٠٠ - ٥٠٠٠٠٠ سنة خلت.P[٢٣٧]P161F وقد تبع ذلك اختراع الأفران واستخدامها في انتاج الفخاريات وتنقية المعادن. كما وفرت النار الضوء وحسنت من الأمان والسلامة. وقد عاشت تجمعات البشر الأولى حياة بدوية، وتنقلوا من مكان لآخر مع تغير فصول السنة بحثاً عن المأوى الأنسب والغذاء.P162F[٢٣٨]



الشكل ١٥٢: "موجلي" الصغير والملك "لوي" في فيلم "كتاب الأدغال".

كانت *الثورة الزراعية Agricultural Revolution* هي المعلم التالي في تطور المجتمعات البشرية.P[٢٣٩]P163F زادت الزراعة من وفرة الغذاء وسمحت باستقرار الجماعات البشرية، مما سبب زيادة عدد السكان بشكل كبير. وفيما يتعلق بتطور استعمال الطاقة كانت قدرة

---

[٢٣٦] أنظر Pauling (1970).

[٢٣٧] أنظر Bowman et al. (2009).

[٢٣٨] للأستاذ الدكتور شريف قنديل كتاب كامل عن النار عنوانه "النار بين الخرافة والعلم".

[٢٣٩] أنظر Heinberg (2011).

المياه والرياح هي مصادر الطاقة "الجديدة". يعود اختراع طواحين المياه إلى ٢٥٠٠ سنة مضت.P[٢٤٠]P164F وقد استخدمها الإنسان هي وطواحين الهواء في طحن الحبوب لإنتاج الدقيق، طحن الزيتون لإنتاج زيت الزيتون، دبغ الجلود، سبك الحديد، نشر الأخشاب، وغيرها من الأنشطة الإنتاجية.P165F[٢٤١]

لقد أدى النمو السكاني السريع في أوروبا قبل نحو ألف عام إلى ضغوط هائلة على الأرض من أجل الزراعة، وجرى التعدي على الغابات من أجل الحصول على المزيد من الأراضي (الشكل ١٥٣).P[٢٤٢]P166F مازالت مثل هذه الممارسات تحدث في بعض مناطق العالم النامي حتى الآن.

يمكن وصف الحقبة الأولى من بحث الإنسان الدؤوب عن مصادر جديدة للطاقة، من اكتشاف النار وحتى الثورة الزراعية، بـ *اقتصاد الطاقة العضوية organic energy economy*.P167F[٢٤٣]

الانتقال إلى اقتصاد الوقود الأحفوري

يعتبر مؤرخو العلم والتكنولوجيا أن اختراع الآلة البخارية كان الشرارة التي أشعلت *الثورة الصناعية Industrial Revolution* في النصف الثاني من القرن الثامن عشر، ومن ثم انتقال المجتمعات الغربية من الاقتصاد العضوي إلى *اقتصاد الوقود الأحفوري fossil fuel economy*. لقد أتاحت هذه الآلة لأول مرة تحويل الطاقة الكيميائية (الحرارة) إلى طاقة ميكانيكية.P[٢٤٤]P168F كان هذا الاختراع الجلل بمثابة الإعلان النهائي عن دخول الإنسان في

---

[٢٤٠] أنظر Lucas (2006).

[٢٤١] أنظر Reynolds (1983).

[٢٤٢] أنظر Georgescu-Roegen (1984) و Fouquet (2011).

[٢٤٣] أنظر Fouquet (2011). تعود بداية دراسة قوانين الديناميكا الحرارية (القوانين التي تحكم انتقال الطاقة وتحولها) إلى ذاك الوقت؛ فقد كان من الطبيعي أن يرغب علماء تلك الفترة في فهم القواعد التي تحكم عمل تلك الآلات "الحديثة" من أجل تحسين أدائها. وتعود بداية دراسة قوانين الديناميكا الحرارية (القوانين التي تحكم انتقال الطاقة وتحولها) إلى ذاك الوقت؛ فقد كان من الطبيعي أن يرغب علماء تلك الفترة في فهم القواعد التي تحكم عمل تلك الآلات "الحديثة" من أجل تحسين أدائها.

[٢٤٤] أنظر McNeil (2000).

"العصر الآلي"، عصر اعتماد الإنسان اللامتناهي على القدرة الميكانيكية الهائلة للألات الجامدة.[٢٤٥]



الشكل ١٥٣: قطع وحرق الغابات في فنلندا في ١٨٩٢.

[٢٤٥] يقول "مورتن مت - سمث Morton Mott-Smith" أن هذا الاختراع قد مكن الإنسان من تحقيق حلمه الأبدي "بالحصول على شيء مقابل لا شيء" (Mott-Smith 1964: 3).

عصر الفحم

كان من الضروري خلال النصف الثاني من القرن السابع عشر تنظيم قطع أشجار الغابات وحتى تقييدها في إنجلترا وأماكن أخرى من أوروبا.P[٢٤٦]P169F وقد ارتفعت أسعار الحطب بشكل كبير في الفترة من ١٦٥٠ إلى ١٧٤٠، مما شجع على استبدال الفحم به تدريجيا.P[٢٤٧]P170F استبدلت صناعات كثيرة الفحم بالحطب خلال القرن الثامن عشر، بينما انتقلت خدمات التدفئة من *الكتلة الحياتية biomass* إلى الوقود الأحفوري بحلول القرن التاسع عشر. ووفقاً لتقدير أحد الباحثين كان سيلزم حصاد ما يعادل مساحة بريطانيا برمتها كل عام من أجل توفير الطاقة المطلوبة للاقتصاد البريطاني لو بقي هذا الاقتصاد حتى العام ١٨٠٠ معتمداً على وقود الحطب.P171F[٢٤٨]

يجدر الإشارة إلى أن الطلب المتزايد على الفحم في القرن التاسع عشر أثار مخاوف بعض المفكرين البريطانيين من استنزاف مناجم الفحم في بلدهم وعواقب ذلك على الإنتاج القومي.P[٢٤٩]P172F غير أن التحسينات التكنولوجية الجديدة مكنت من توفير معروض دائم من الفحم، وحافظت على أسعاره منخفضة.P[٢٥٠]P173F علاوة على ذلك أدى إدخال موارد الطاقة "الجديدة"، مثل البترول ونواتج البترول الثانوية، إلى زيادة استخدام "خلائط الطاقة الأحفورية fossil energy mix".

"د ع ـ العاصمة البريطانية لندن من تلوث الهواء منذ القرن الثالث عشر، وزادت المشكلة ـوء في القرن السابع عشر. وقعت أسوأ حوادث تلوث الهواء في تاريخ المملكة المتحدة في ٥ بسمبر ١٩٥٢: "دخاب/سخاب لندن العظيم The Great Smog of London" الذي استمر خمسة أيام متواصلة (الشكل ١٥٤). تذكر التقارير الحكومية أن ٤٠٠٠ شخص ماتوا كنتيجة مباشرة للتلوث، ومرض ١٠٠٠٠٠ آخرين بسبب آثار السخاب الضارة على الجهاز التنفسي.

---

[٢٤٦] أنظر Georgescu-Roegen (1984).

[٢٤٧] أنظر Fouquet (2008 & 2011).

[٢٤٨] أنظر Wrigely (1988).

[٢٤٩] أنظر Jevons (1865).

[٢٥٠] أنظر Fouquet (2006).

ويشير بحث حديث نسبياً إلى أن حجم الوفيات كان أعلى من هذا بكثير: نحو ١٢٠٠٠ شخص. كان الطقس البارد قد دفع ساكني العاصمة البريطانية إلى حرق كميات كبيرة من الفحم لتدفئة منازلهم، وكانت هناك العديد من محطات الكهرباء التي تعمل بالفحم حول منطقة لندن الكبرى. لم يكن الفحم المستخدم محلياً بعد الحرب من النوعية الجيدة (التي كانت تصدر للخارج)، وكانت نسبة الكبريت به عالية. ووفقاً لمكتب الأرصاد الجوية بالمملكة المتحدة وصلت كمية الانبعاثات اليومية من الملوثات خلال تلك الكارثة إلى ١٠٠٠ طن من جسيمات الدخان، ٢٠٠٠ طن من ثاني أوكسيد الكربون، ١٤٠ طناً من حمض الهيدروكلوريك، و٣٧٠ طناً من ثاني أوكسيد الكبريت (التي ربما قد تكون تحولت إلى نحو ٨٠٠ طن من حمض الكبريتيك).



الشكل ١٥٤: العاصمة البريطانية أثناء السخاب العظيم (٥ - ٩ ديسمبر ١٩٥٢).

بمناسبة الحديث عن تلوث هواء لندن القديم، يقال أن "غاندي Ghandi" الشاب صدم كثيراً عندما وطئت قدماه في سبتمبر ١٨٨٨ لأول مرة عاصمة الإمبراطورية التي لم تكن تغرب عنها الشمس وكان يحلم في صباه بالذهاب إليها:

> ...هل هذه الأكواخ العفنة في "است اند [East End]" التي ينعقد فوقها الدخان الخانق، هل هذه المصانع الجهنمية بجلبتها، هل هذه الأفران العالية والآبار والمناجم التي لا ترى النور، وهل هذه الأرصفة التي يجللها الضباب ... هل هذا كله هو الموطن الذي يعيش فيه الشعب الفاتح الحر والسيد؟P[٢٥١]P174F

---

[٢٥١] من توطئة كتاب المهاتما غاندي *حضارتهم وخلاصنا* (ص ١٦).

عصر النفط

مهدت عملية تكرير النفط الخام الطريق لعصر النفط. وتعتبر *آلة الأحتراق الداخلي* *internal compusion engine* هي الاختراع الرئيسي الذي نشط من استخدام زيت البترول المكرر؛ فقد ارتفع استخدام النفط بشكل كبير بداية من ١٨٨٠ عقب اختراعها في ألمانيا "الإمبراطورية".P175F.[٢٥٢]

وصل إنتاج البترول في الولايات المتحدة إلى أقصاه في ستينات القرن العشرين، وأصبح الاقتصاد العالمي يعتمد بشكل أساسي على هذا "الذهب الأسود" الجديد. اعتماداً وصف احياناً بالإدمان. وقد ساعد على ذلك بقاء أسعار النفط رخيصة نسبياً حتى أزمة ١٩٧٣.[٢٥٣]

سبب الحظر النفطي غير المسبوق ردود أفعال كبيرة في الولايات المتحدة والكثير من الدول الصناعية الكبرى (الشكل ١٥٥). قفز سعر النفط فور الحظر من ثلاثة دولارات إلى ١٢ دولاراً للبرميل. استمرت الأسعار في الارتفاع بعد رفع الحظر في مارس ١٩٧٤، وبدأ المحللون في الغرب يتحدثون عن انتهاء عصر النفط الرخيص (الشكل ١٥٦).

لم يكد الغرب يستوعب صدمة ١٩٧٣ حتى جاءت أزمة النفط الثانية في ١٩٧٩. كان من ضمن نتائج هاتين الأزمتين حدوث زيادة سريعة في استخدام الغاز الطبيعي.

---

[٢٥٢] أنظر McNeill (2000).

[٢٥٣] خلال حرب ١٩٧٣ فرضت الدول العربية الأعضاء في منظمة الأوبك حظرا نفطيا على الولايات المتحدة (والدول المساندة لإسرائيل) ردا على قرارها بإعادة التسليح الفوري للجيش الإسرائيلي بهدف تقوية الطرف الإسرائيلي في مفاوضات ما بعد الحرب.



الشكل ١٥٥: حظر البترول غير المسبوق في ١٩٧٣.



الشكل ١٥٦: انتهاء عصر النفط الرخيص في ١٩٧٣.

العودة للأصول من جديد

وقعت بداية من ستينات القرن العشرين عدة أحداث متعاقبة دفعت بالدول الصناعية إلى الاهتمام بالمصادر غير الأحفورية للطاقة.P177F[٢٥٤]

في سبتمبر ١٩٦٢ نشر كتاب "الربيع الصامت Silent Spring" الشهير لعالمة التاريخ الطبيعي "راتشل كارسون Rachel Carson"، وكثيراً ما ينسب إلي هذا الكتاب الفضل في الإسهام في انطلاقة الحركة البيئية في الولايات المتحدة والغرب عموما.[٢٥٥]

شهد عام ١٩٧١ ظهور ما يعرف بجمعيات الضغط البيئية ذات الطبيعة الدولية، مثل "السلام الأخضر Green Peace" و"أصدقاء الأرض Friends of the Earth".

في ١٩٧٢ انعقد أول مؤتمر للأمم المتحدة عن البيئة في ستوكهولم Stockholm عاصمة السويد (مؤتمر الأمم المتحدة عن البيئة البشرية UN Conference on the Human Environment).P178F[٢٥٦] كانت الدول الصناعية المتقدمة هي من دعت إلى هذا المؤتمر لمناقشة التأثيرات البيئية للتصنيع؛ كانت السويد مثلاً مهتمة بمشكلة المطر الحمضي acid rain، واليابان بتلوث بحارها بالنفايات الصناعية السامة (مثل مركبات الزئبق).

ثم جاء "الذعر" الاقتصادي بعد أزمتي البترول في ١٩٧٣ و١٩٧٩، وبدأ صانعوا السياسات في الغرب يتحدثون عن ضرورة البحث عن مصادر بديلة لـ "نفط العرب" (الشكل ١٥٧).

شجعت هذه الأحداث وغيرها البحث عن مصادر بديلة "أنظف" وغير محدودة للطاقة، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية وغيرهما مما يعرف بمصادر الطاقة المتجددة. رغم النمو

---

[٢٥٤] لتحليل مفصل لهذه الأحداث أنظر هشام الزيات (٢٠١٠).

[٢٥٥] تسمية هذا الكتاب مستوحاة من بيت في قصيدة "الجميلة بلا رحمة La belle Dame sans Merci" للشاعر جون كيتس (١٨١٩) John Keats - يقول ذاك البيت "تلاشت الأعشاب من البحيرة، وتوقفت الطيور عن الغناء The sedge has withered from the lake, And no birds sing".

[٢٥٦] وافقت الجمعية العمومية للأمم المتحدة على تنظيم هذا المؤتمر بمبادرة من السويد. انعقد المؤتمر في الفترة ٥ - ١٦ يونيو، وشارك فيه ممثلين لـ ١١٣ دولة.

المتواصل في الإنتاج العالمي من الطاقة المتجددة خلال العقد الأخير (الشكل ١٥٨) إلا إنها لا توفر حالياً سوى نحو ١٤% من الاستهلاك العالمي.

تأتي الطاقة المائية على رأس قائمة مصادر الطاقة المتجددة من حيث حجم الانتاج، يليها طاقة الرياح (الشكل ١٥٩). ربما يرجع هذا للأسباب التالية:

- الطاقة المائية وطاقة الرياح معروفة ومستغلة منذ القدم. في البداية عن طريق السفن الشراعية وطواحين المياه أو الهواء، وبعد ذلك مولدات الكهرباء المائية (بدأ تشغيل أقدم محطة كهرباء مائية في العالم في ٣٠ سبتمبر ١٨٨٣ على نهر "فوكس Fox" بولاية "وسكنسن Wisconsin" الأمريكية (الشكل ١٦٠))؛
- الأنهار الهادرة والرياح العاصفة هي من عناصر الطبيعة والمناخ المنتشرة في الكثير من البلاد الصناعية الكبرى؛
- وتاريخياً كانت معظم الإمبراطوريات الكبرى متقدمة في مجالات العلوم والتكنولوجيا البحرية (أي المائية. الجوية).

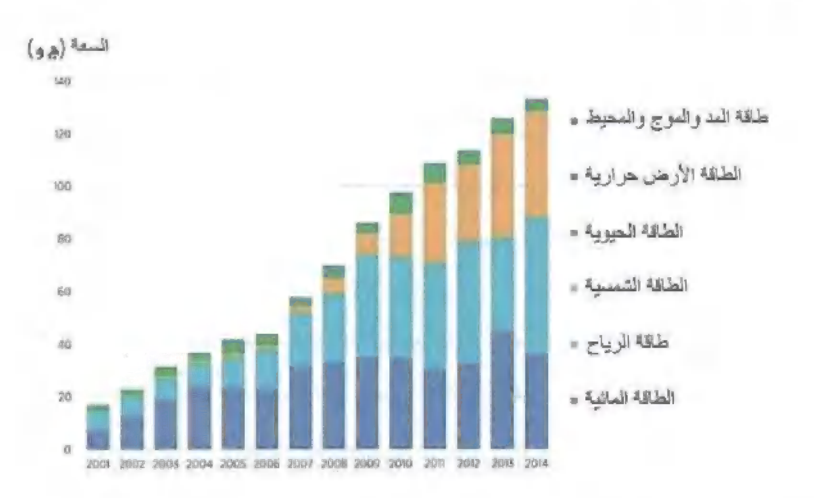
It has never been more imperative that the oil importing nations of the world join together to develop new and alternative sources of energy... I would like to see the day when we can turn to these countries and say "We don't need your oil, thank you."

-Williamson S. Stuckey, Jr.

الشكل ١٥٧: قول مشهور لأحد الساسة الأمريكيين بعد الحظر النفطي يدعو فيه إلى تطوير مصادر بديلة للطاقة.

ليس مستغرباً أن تحتل الصين المرتبة الأولى من حيث إنتاج الطاقة المتجددة جملة وتفصيلاً باستثناء الكهرباء الحياتية والأرض. حرارية والشمسية المتركزة؛ حيث تحتل الولايات المتحدة

هذه المرتبة بالنسبة للكهرباء الحياتية والأرض - حرارية، وتحتلها إسبانيا بالنسبة للكهرباء الشمسية المتركزة.P179F[257]



الشكل ١٥٨: الإنتاج العالمي من الطاقة المتجددة. المصدر: IRENA

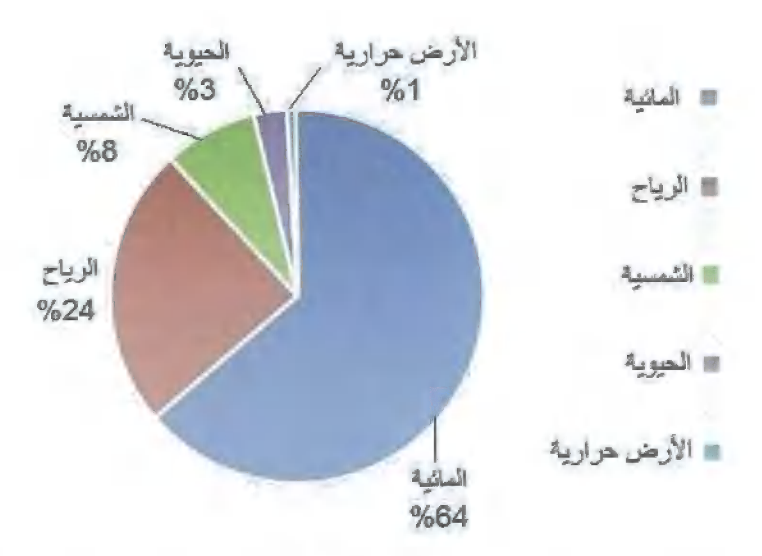
تتواجد محطات الكهرباء المائية منذ زمن في مناطق مختلفة من العالم، وإن كانت تكثر في بعض الدول: الصين، البرازيل، الولايات المتحدة، كندا، والاتحاد الروسي.P180F[258]

بعيداً عن الصين نجد أن الكهرباء من الرياح هي الأكثر استخداماً من بين مصادر الطاقة المتجددة في كل من الأمريكتين (الشمالية والجنوبية) وأوروبا، في حين تتقدم عليها الشمسية الضوء - جهدية في كل من آسيا والمحيط الهادي (في اليابان وأستراليا بشكل رئيسي).

---

[257] أنظر (IRENA (2016: 21.

[258] المرجع السابق



الشكل ١٥٩: السعات من الطاقة المتجددة المنشأة حتى ٢٠١٤. المصدر: IRENA



الشكل ١٦٠: سد "نهر فوكس Fox" بولاية "وسكنسن Wisconsin" الأمريكية.

إن أول ما يلحظه الزائر لمنتجعات "بالم سبرنجز Palm Springs" الشتوية في ولاية كاليفورنيا الأمريكية هو كثرة طواحين الرياح الحديثة التي تملأ المنظر الطبيعي لهذه المنطقة (الشكل ١٦١). أما الزائر الجديد للمناطق المفتوحة على الحدود الهولندية - الألمانية فعادة ما يلاحظ شيئين: الأول هو الرياح الشديدة التي قد تعصف بتلك المناطق، والثاني هو "مزارع الرياح" العديدة التي تمتد عبر الأفق.

تشتهر هولندا الحالية (أو "الأراضي المنخفضة" كما يعني في الأصل اسمها الرسمي: "37TUNetherlandsU37T") بطواحينها الهوائية العتيقة والحديثة على حد سواء (الشكل ١٦٢).[٢٥٩]P181F



الشكل ١٦١: طواحين الرياح بالقرب من "بالم سبرنجز" بولاية كاليفورنيا الأمريكية.

[٢٥٩] تعود أقدم طاحونة هواء في هولندا إلى القرن الميلادي الثامن.



الشكل ١٦٢: طواحين الرياح الحديثة في هولندا.

تعتبر طواحين "كيندرديك 37TUKinderdjikU37T" الثمانية عشر في جنوب البلاد من المزارات السياحية العالمية االشهيرة (الشكل ١٦٣). شيدت هذه الطواحين في حدود العام ١٧٤٠ كجزء من منظومة إدارية أكبر لإدارة الفيضانات. وقد أعلنتها "اليونسكو UNESCO" في العام ١٩٩٧ أحد "مواقع التراث العالمي World Heritage Sites" التي يجب المحافظة عليها.

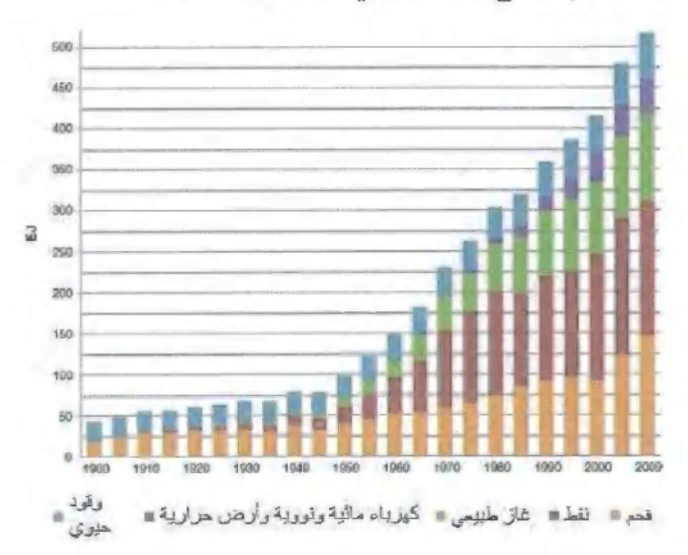
الصورة الكبرى

احتل الفحم موقع الصدارة منذ السنوات الأولى للقرن العشرين، في حين أخذ النفط نصيب الأسد منذ أوائل ستينات هذا القرن (الشكل ١٦٤). زاد استخدام الغاز الطبيعي بشكل كبير بعد الحرب العالمية الثانية، بينما نمى بثبات استخدام الكهرباء المائية، النووية، والأرض- حرارية منذ بداية سبعينات نفس القرن (العشرين). أما الوقود الحيوي فقط زاد بمعدل ثابت نوعاً ما في الفترة من ١٩٠٠-٢٠٠٠، ثم بمعدل متزايد من بعد سنة ٢٠٠٠. ولا يزال العالم حتى وقتنا هذا يحصل على نحو ٨٦% من احتياجاته من الطاقة من حرق الوقود الأحفوري (زيت النفط ٣٢%، الفحم ٣٠%، والغاز ٢٤%).

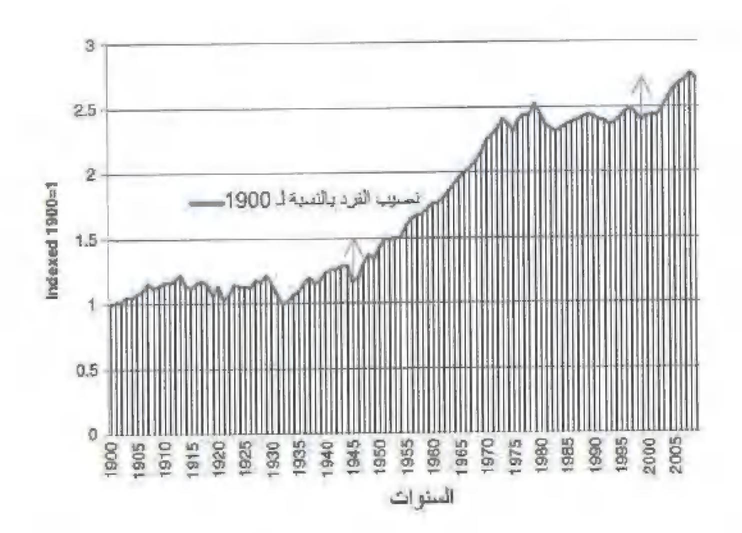


الشكل ١٦٣: طواحين "كيندرديك" الهولندية الشهيرة.

يوضح الشكل ١٦٥ نصيب الفرد من معروض الطاقة الأولية خلال الفترة من ١٩٠٠ ـ ٢٠٠٩. نلاحظ وجود زيادة كبيرة لاستخدام الطاقة بعد الحرب العالمية الثانية، نوعاً من الثبات في الفترة من ١٩٨٠ ـ ٢٠٠٠، ثم تسارع مرة أخرى في الفترة من ٢٠٠٠ ـ ٢٠٠٩.



الشكل ١٦٤: المعروض العالمي من الطاقة ١٩٠٠ ـ ٢٠٠٩. المصدر: Bithas & Kalimeris (2016: 8)



الشكل ١٦٥: نصيب الفرد من المعروض العالمي للطاقة منسوباً لنصيبه في ١٩٠٠.

المصدر: Bithas & Kalimeris (2016: 9)

ملحق ٢: مقدمة قصيرة جداً عن كيمياء الأغشية

صنعت أغشية التناضح العكسي في البداية من أسيتات السليولوز. وفي ثمانينات القرن الماضي استبدلت أغشية المركبة الرقيقة بأغشية السليلوز. تتكون هذه الأغشية من طبقة رقيقة من البولي أميد (النايلون nylon) مدعومة بطبقة أسمك من البولي سلفون. تنتمي كل هذه المواد إلى مجموعة من المركبات الكيميائية تعرف بسم *البوليمرات polymers*.P٢٦٠P182F فما هي البوليمرات وما أهميتها؟

البوليمرات

البوليمرات هي مجموعة من المركبات الكيميائية ذات جزيئات كبيرة جداً تظهر نمطاً متكرراً من وحدات (أو تركيبات) كيميائية أصغر (الشكل ١٦٦).

الشكل ١٦٦: سلسلة واحدة من النايلون ٦.

تضم البوليمرات مجموعة كبيرة من المواد الطبيعية والمخلقة. الصوف، القطن، الحرير، الخشب، والجلد هي بعض الأمثلة على *البوليمرات الطبيعية natural polymers* التي عرفها الإنسان واستخدمها منذ قديم الزمن. تشمل هذه المجموعة أيضاً *البوليمرات الحياتية biopolymers* المكونة لأجسام جميع الكائنات الحية، مثل البروتينات، الكربوهيدرات، والدهون.

---

[٢٦٠] الكلمة الإنجليزية "polymer" مشتقة من الكلمة اليونانية "*polymerēs*" وتعني حرفيا "كثيرة الأجزاء".

البوليمرات المخلقة synthetic polymers تشمل مجموعة كبيرة من المواد التي ابتكرها الإنسان، والتي تعرف إجمالاً بسم البلاستيك. من أشهر هذه المواد النايلون (البولي أميد)، البوليستر polyester، والبولي إيثيلين polyethelene (الذي تصنع منه الأكياس البلاستيكية). ولجوارب النايلون قصة مشهورة خلال الحرب العالمية الثانية (الشكل ١٦٧).

وقد استطاع الكيميائيون ابتكار بوليمرات ذات خصائص متنوعة مطلوبة (مثل القوة، الصلابة، الكثافة، مقاومة الحرارة، والتوصيل الكهربائي)، فأصبحت البوليمرات تستخدم في جميع مناحي الحياة العصرية.



الشكل ١٦٧: مئات السيدات ينتظرن في طابور طويل في صباح بارد من ديسمبر ١٩٤٥ لشراء جوارب نايلون من أحد محلات نيويورك.

نلاحظ أن التعبير عن التركيب الكيميائي لجزيء البولي إيثيلين تم بطريقتين (الشكل ١٦٨). في الأولى (جهة اليسار)، يشير الخطان المتعرجان في نهاية التركيب الطويل إلى تكرار نفس النمط عدداً غير محدود من المرات. في الطريقة المختصرة (جهة اليمين)، وهي المفضلة، يحاط التركيب المتكرر بقوسين، وهذا يعني الشيء نفسه.

البلمرة

تصنع البوليمرات (وترجمتها "الوحدات المتعددة") المخلقة كيميائياً من *المونومرات monomers* (أي الوحدات المنفردة) المقابلة لها: البولي أميد من الأميد amide، البوليستر

من الاستر ester، والبولي إيثيلين من الإيثيلين ethylene. يطلق على هذه العملية الكيميائية اسم *البلمرة polymerization* (الشكل ١٦٨).

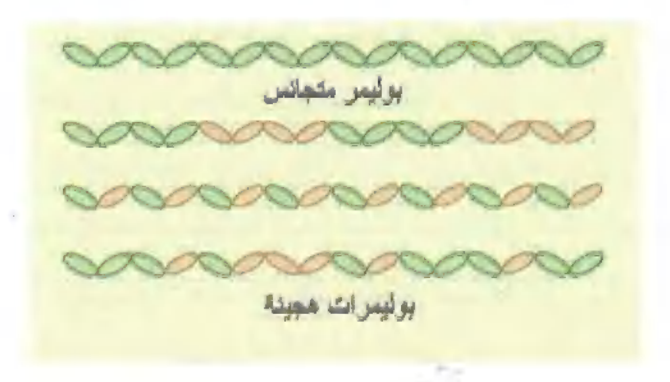
الشكل ١٦٨: تخليق البولي إيثيلين (بوليمر) من الإيثيلين (مونومر).

جزيئات معظم المونومرات ثابتة كيميائياً (لا تميل للتفاعل مع غيرها)؛ لذا أبتكر الكيميائيون طرق عامة لجعل جزيئات المونومرات تتفاعل مع بعضها البعض بانية مع تقدم التفاعل.

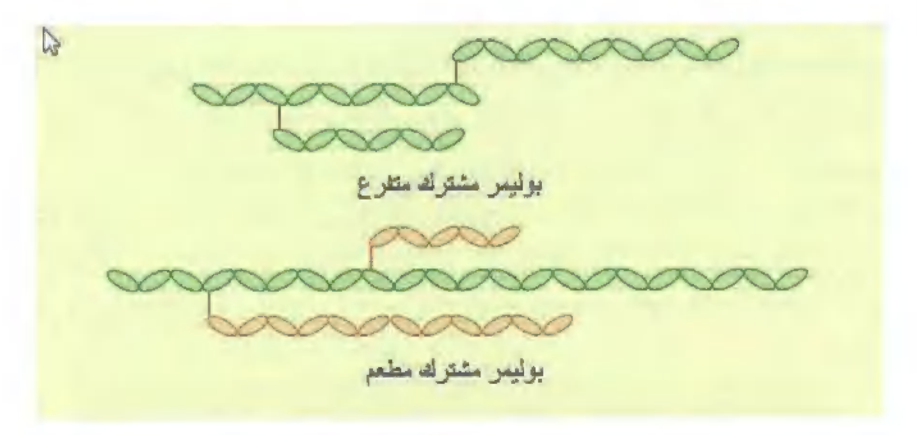
السلسلة الأساسية للبوليمر المطلوب تكوينه.

أنواع وأشكال البوليمرات

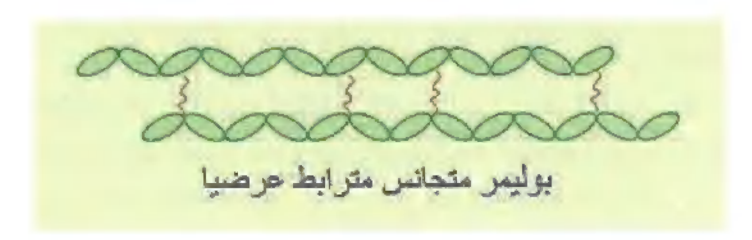
البوليمرات التي تتكون من وحدات مونومرية متماثلة (كما في حالة البولي إيثيلين) تسمى *بوليمرات متجانسة homopolymers*، أما تلك التي تتشكل من أكثر من نوع من المونومرات (كما هو الحال في البولي أميد) فتسمى *البوليمرات المتباينة* (أو *الهجينة*) *heteropolymers*. الاسم الأكثر شيوعاً للبوليمرات المخلقة المتباينة هو *البوليمرات التساهمية* (أو *المشتركة*) *copolymers*.



قد تأخذ جزيئات البوليمر شكل سلاسل مستقيمة أو سلاسل متفرعة مكونة أشكالاً متنوعة.



يمكن أن ترتبط المونومرات ببعضها البعض من الأطراف أو ترتبط بينياً (أو عرضيا). تجعل الروابط البينية البوليمرات المتكونة أكثر صلابة. وإذا كانت هذه الروابط طويلة ومرنة لحد ما، تستطيع السلاسل المتجاورة التحرك بالنسبة لبعضها بعضا، منتجة *بوليمرات مرنة elastic polymers* أو ما يعرف اختصاراً بال *مطاط elastomers*.

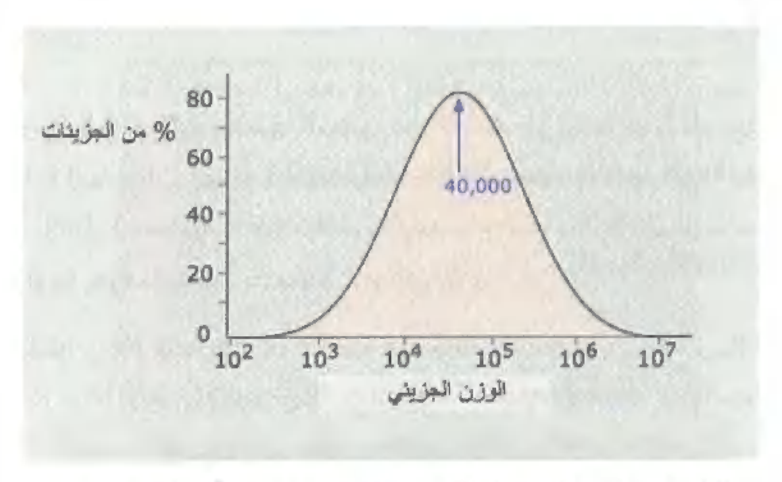




لا تدع الصيغ الكيميائية للبوليمرات تجعلك تعتقد أن جزيئات البوليمرات هي عادة سلاسل مستقيمة من الذرات المرتبة. على العكس، فالدوران الحر لرابطة C-C يسمح لجزيئات البوليمر الطويلة بالالتفاف والتشابك مثل المكرونه الإسباجتي. لذلك، تكون البوليمرات بشكل عام *مواد صلبة لابلورية amorphus solids*.

الطبيعة الخاصة للبوليمرات

تتميز "المادة النقية" في معظم مجالات الكيمياء بتركيب كيميائي محدد وخصائص ثابتة. ليس الوضع كذلك مع معظم البوليمرات المخلقة؛ حيث لا يكون للنوع الواحد من البوليمرات وزناً جزيئياً واحداً بل مدى واسع من الأوزان الجزيئية. تعتبر أغلب البوليمرات في الحقيقة خلائط وليست مواد نقية بالمعنى المعتاد كيميائيا. لذلك يعبر عن الوزن الجزيئي الخاص بالبوليمر عن طريق الـ *توزيع تكراري frequency distribution* للأوزان الجزيئية الممكنة (الشكل ١٦٩).



الشكل ١٦٩: التوزيع التكراري للوزن الجزيئي لأحد البوليمرات.

الأغشية المركبة الرقيقة

لنعد مرة أخرى إلى النايلون أو البولي اميد. هذه المرة لذلك المستخدم في أغشية التناضح العكسي.

البولي أميدات هي البوليمرات التي ترتبط فيها "الوحدات المتكررة repeating units" معاً بروابط أميدية/ببتيدية amide/peptide bonds. وهي تضم بوليمرات طبيعية مثل البروتينات (ومنها الصوف والحرير) وبوليمرات مخلقة مثل النايلون ٦،٦ (الشكل ١٧٠).

الشكل ١٧٠: التركيب الكيميائي للنايلون ٦،٦.

تصنيع الأغشية المركبة الرقيقة

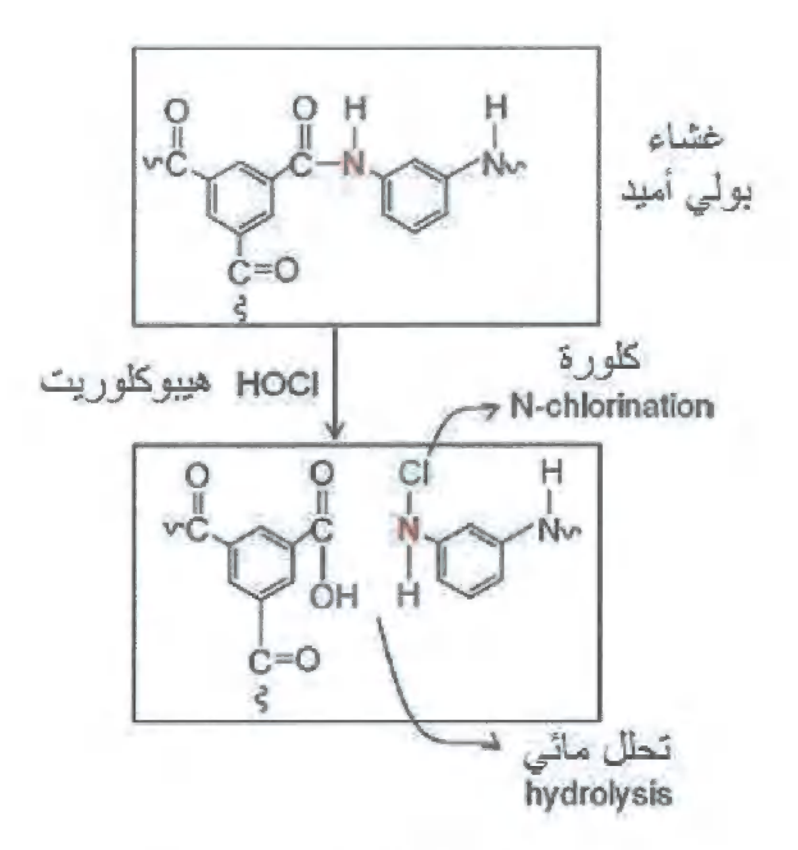
تخلق طبقة البولي أميد (المحتوية على *روابط بينية cross links* كثيرة لتسمح بمرور الماء ومنع الأملاح) من تفاعل المونومرين ثنائي أمين الفينالين diamine phenylene-m وكلوريد ثلاثي الميزويل trimesoyl chloride (الشكل ١٧١).

لصنع الأغشية المركبة الرقيقة يذاب ثنائي أمين الفينالين في الماء، ويذاب كلوريد ثلاثي الميزويل في مذيب عضوي لا يمتزج بالماء مثل الهكسان hexane. تغمر الطبقة الداعمة المسامسية في المحلول المائي ثم تلامس بالمحلول العضوي. بهذه الطريقة ينحصر تكون البولي أميد في المنطقة الفاصلة حيث يتلامس المحلولان.

أحد مساوئ استخدام البولي أميد في أغشية التناضح العكسي هو تعرض الروابط الأميدية (المعلمة بمستطيل أحمر في الشكل ١٧١) للتأكسد بفعل الكلور وغيره من *العوامل المؤكسدة oxidizing agents*، مما يسبب فقدان هذه الأغشية لخاصية النفاذية الإنتقائية أي السماح بمرور الماء دون الأملاح الذائبة فيه (الشكل ١٧٢). وتسرع آثار المعادن الموجودة في المياه من تأكسد هذه الأغشية. تستطيع الأغشية المركبة تحمل ١٠٠٠ جفـم. ساعة من الكلورين (الكلور) في المتوسط.[٢٦١]

الشكل ١٧١: تخليق البولي أميد المستخدم في الأغشية المركبة الرقيقة. المصدر: Elimelech & Phillip (2011)

[٢٦١] أي حاصل ضرب تركيز الكلورين في مياه التغذية (بالجزء في المليون) في مدة تعرض الأغشية لهذا التركيز (بالساعة) يساوي ١٠٠٠ ج ف م - ساعة.



الشكل ١٧٢: تلف الأغشية المركبة بفعل الكلور.

الكاتبان



ا د شريف قنديل

- يعمل حالياً بجامعة الإسكندرية (مصر) وعمل سابقاً بجامعتي الخليج العربي (البحرين) والإمارات العربية المتحدة (الإمارات)؛
- الرئيس المؤسس لقسم علوم المواد بجامعة الإسكندرية؛
- مؤسس الجمعية العربية لعلوم المواد؛
- المدير التنفيذي للبرنامج المصري لتطوير التعليم (٢٠٠٥ - ٢٠٠٩).



د هشام الزيات

- يعمل حالياً بجامعة الإسكندرية (مصر) وعمل سابقاً بجامعة الدمام (السعودية)؛
- زميل "برنامج هامفري Humphrey Fellowship Program" (الولايات المتحدة) و"سمنار سالزبورج العالمي Salzburg Global Seminar" (النمسا)؛
- تتركز اهتماماته الأكاديمية في المجالات التالية: الإدارة البيئية؛ الصحة والسلامة البيئية؛ تبسيط العلوم والتكنولوجيا؛ الإعلام التقني؛ والتصميم المتمركز حول الإنسان؛ تمتع بالتعلم والتدرب واكتساب الخبرات المهنية والحياتية في بلدان ومن ثقافات متعددة: مصر، إيطاليا، ألمانيا الشرقية سابقاً، تشيكوسلوفاكيا سابقاً، الولايات المتحدة، النمسا، فرنسا، أستراليا، النرويج، سويسرا، كندا، السعودية، إسبانيا، واليونان.



قواعد النشر

قواعد النشر

ترحب سلسلة عالم البيئة باقتراحات التأليف أو الترجمة في المجالات المحددة أدناه وفقاً للشروط التالية :

١ - تكون الأولوية للقضايا الملحة بالمنطقة العربية، والأفكار القابلة للتطبيق.

٢ - أن يكون الحجم في حدود ٢٠٠ - ٣٠٠ صفحة من القطع المتوسط.

٣ - أن لا يكون قد تم نشر الكتاب كاملاً أو في أجزاء من قبل.

٤ - أن لا يكون هناك نسخ لنصوص من كتاب أو بحث آخر باستثناء ما يشار إليه كإقتباس مع تسجيل كل المراجع التي استخدمت في التأليف.

٥ - في حالة الترجمة يُشار إلى صفحات الكتاب الأصلي، المقابلة للنص المترجم، وترفق نسخة باللغة الأصلية للكتاب المُترجم وموافقة المؤلف.

٦ - الهيئة الإستشارية غير ملزمة بقبول كل الاقتراحات التي تقدم لها.

٧ - يكون نشر الكتاب المقترح حسب الأولويات التي تحددها الهيئة الاستشارية وهيئة التحرير.

٨ - لاتُرد المسودات والكتب الأجنبية في حالة الإعتذار عن نشرها.

٩ - أن ترسل أولاً مذكرة بالفكرة العامة للكتاب وموضوعاته وأهميته على الإستمارة المرفقة لإقتراح كتاب للنشر مصحوبة بالسيرة الذاتية للمؤلف.

١٠ - يرسل الكتاب إلى محكمين متخصصين في موضوعه لإبداء الرأي حول صلاحيته للنشر.

١١ - في حالة إجازته من المحكمين والموافقة عليه من هيئة التحرير، يستحق المؤلف مبلغ ١٥,٠٠٠ درهم إماراتي، أو ما يعادلها يتم تحويلها للمؤلف بعد إكمال كل التعديلات المطلوبة، وتقديم نسخة إليكترونية ليطبع الكتاب.

١٢ - في حالة قبول الترجمة والتعاقد يستحق المترجم مبلغ ١٠,٠٠٠ درهم إماراتي أو ما يعادلها، يتم تحويلها بعد إكمال كل التعديلات المطلوبة وتقديم نسخة إليكترونية ليطبع الكتاب.

١٣ - المترجم مسؤول عن حق الملكية الفكرية بالنسبة للمؤلف.

١٤ - مؤسسة زايد الدولية للبيئة غير مسؤولة عن محتويات الكتاب والفكرة المنشورة تعبر عن رأي الكاتب.

١٥ - لايحق للمؤلف أو المترجم إعادة الطبع،إلا بموافقة خطية من«مؤسسة زايد الدولية للبيئة»، التي تحتفظ بحقوق النشر.

مجالات السلسلة:

تدور مجالات السلسلة في فلك الإطار الشامل، لصون البيئة والموارد الطبيعية، وفقاً لأسس التنمية المستدامة التي تحقق التوازن بين التنمية الاقتصادية والتنمية الاجتماعية، وحماية البيئة، وتشمل المجالات الآتية:

١ - التنمية المستدامة وما يتعلق بتحقيقها من آليات اقتصادية واجتماعية وبيئية.

٢ - إدارة النظم الايكولوجية.

٣ - المياه العذبة .

٤ - صون التنوع الحيوي وحماية الحياة الفطرية وتنميتها.

٥ - البيئة البحرية والإدارة البيئية المتكاملة للمناطق الساحلية.

٦ - التنمية المستدامة للمناطق الزراعية ومناطق الرحل.

٧ - مكافحة التلوث.

٨ - التقنيات السليمة بيئياً وإدخالها في عمليات الإنتاج وإدارة الموارد.

٩ - صحة البيئة.

١٠ - نشر وتعزيز الوعي البيئي والمشاركة الشعبية.

١١ - التربية البيئية، والإعلام البيئي.

١٢ - التشريع البيئي وآليات تطبيق القوانين واللوائح.

١٣ - تعزيز دور المرأة والبيئة والتنمية.

١٤ - الأمن البيئي .

قائمة الإصدارات



سلسلة كتاب عالم البيئة

١- «مقدمة في إقتصاديات البيئة» (٢٠٠٣) د. محمد عبدربه، جامعة الأسكندرية.

٢- «الغطاء النباتي الفطري» (٢٠٠٤) أ.د. محمود زهران، جامعة المنصورة

٣- «الطاقة والتنمية المستدامة في الدول العربية» (٢٠٠٤) د. هشام الخطيب، الأردن

٤- «الزراعة النظيفة» (٢٠٠٥)- أ.د. محمد صابر، المركز القومى للبحوث، القاهرة

٥- «المعارف التراثية في صحارى الوطن العربي» (٢٠٠٦)

أ.د. كمال الدين البتانوني، جامعة القاهرة

والمهندس حسن كمال الدين البتانوني، جهاز شئون البيئة، مصر

٦- «البيئة الحضرية : الفرص والتحديات» (٢٠٠٧)

د. محمد عبد الكريم عبدربه والدكتور محمود عادل حسن، جامعة الأسكندرية

٧- «النظام البيئي لغابات القرم (المانجروف) على سواحل البحر الأحمر وشبه الجزيرة العربية» (٢٠٠٧) أ.د. محمود زهران، جامعة المنصورة

٨- «التخطيط البيئي ودوره الإستراتيجي في الحفاظ على البيئة» (٢٠٠٨)

د. عادل عبد الرشيد عبد الرزاق، الهيئة العامة لحماية البيئة اليمنية – عدن

٩- «الأمن المائي العربي: نحو إدارة متكاملة ومستدامة للموارد المائية العربية»

(٢٠٠٩) د. محمد عبد الحميد داؤد، هيئة البيئة – أبوظبي

١٠- «الربيع الغائم: الحد من دوامة إفساد البيئة» (٢٠٠٩)

أ.د. محمد صابر، المركز القومي للبحوث، القاهرة

١١- «الإدارة البيئية» (٢٠١٠) - د. هشام الزيات، جامعة الأسكندرية

١٢- «البيئة من منظور اسلامي» (٢٠١١)

أحمد مبارك سالم عبد الله – مستشار المجلس الوطني بالبحرين.

١٣- «الأمن البيئي» (٢٠١٢) - أ.د. حيدر عبد الرزاق كمونة – جامعة بغداد

١٤- «الأبنية الخضراء» (٢٠١٣) – د. أيوب أبودية – مهندس استشاري، عمان - الأردن

١٥- «وثيقة دبي حول التنفيذ الإقليمي العربي لمخرجات ريو+٢٠» (٢٠١٣)

الأسكوا / جامعة الدول العربية / برنامج الأمم المتحدة للبيئة / مؤسسة زايد الدولية للبيئة / وزارة البيئة والمياه بدولة الإمارات.

١٦- «جدلية الحداثة والبيئة في عمارة أبوظبي» (٢٠١٤).

د. محمد محمود عباس – مهندس معماري ، بلدية أبوظبي

١٧- «البيئة والميكروبات في حياتنا اليومية» (٢٠١٤).

أ.د. محمد صابر، المركز القومى للبحوث، القاهرة

١٨- «التنمية المستدامة في الدول العربية» (٢٠١٥)

د. نواز عبد الرحمن الهيتي، جامعة قطر

١٩- «الطاقة والإنسان والبيئة» (٢٠١٦)

د. أيوب عيسى أبودية، الأردن

٢٠- «نحو تنمية مستدامة للموارد الطبيعية لتحقيق أمن غذائي عربي» (٢٠١٦)

أ.د. صبري فارس الهيتي، جامعة بغداد - العراق

٢١- «الكوارث والبيئة» (٢٠٠٨) – عدد خاص

د. أسامة منصور السواح، أكاديمية شرطة دبي

٢٢- «دبي والإقتصاد الأخضر» (٢٠١٦) – عدد خاص

د. أسامة منصور السواح، أكاديمية شرطة دبي

وتصدر المؤسسة مجلة شهرية
بعنوان «البيئة والمجتمع»
باللغتين العربية والإنجليزية منذ ١٩٩٩
ومجلة شهرية للأطفال
بعنوان «أحباب البيئة» ابتداءاً من ٢٠١٧.

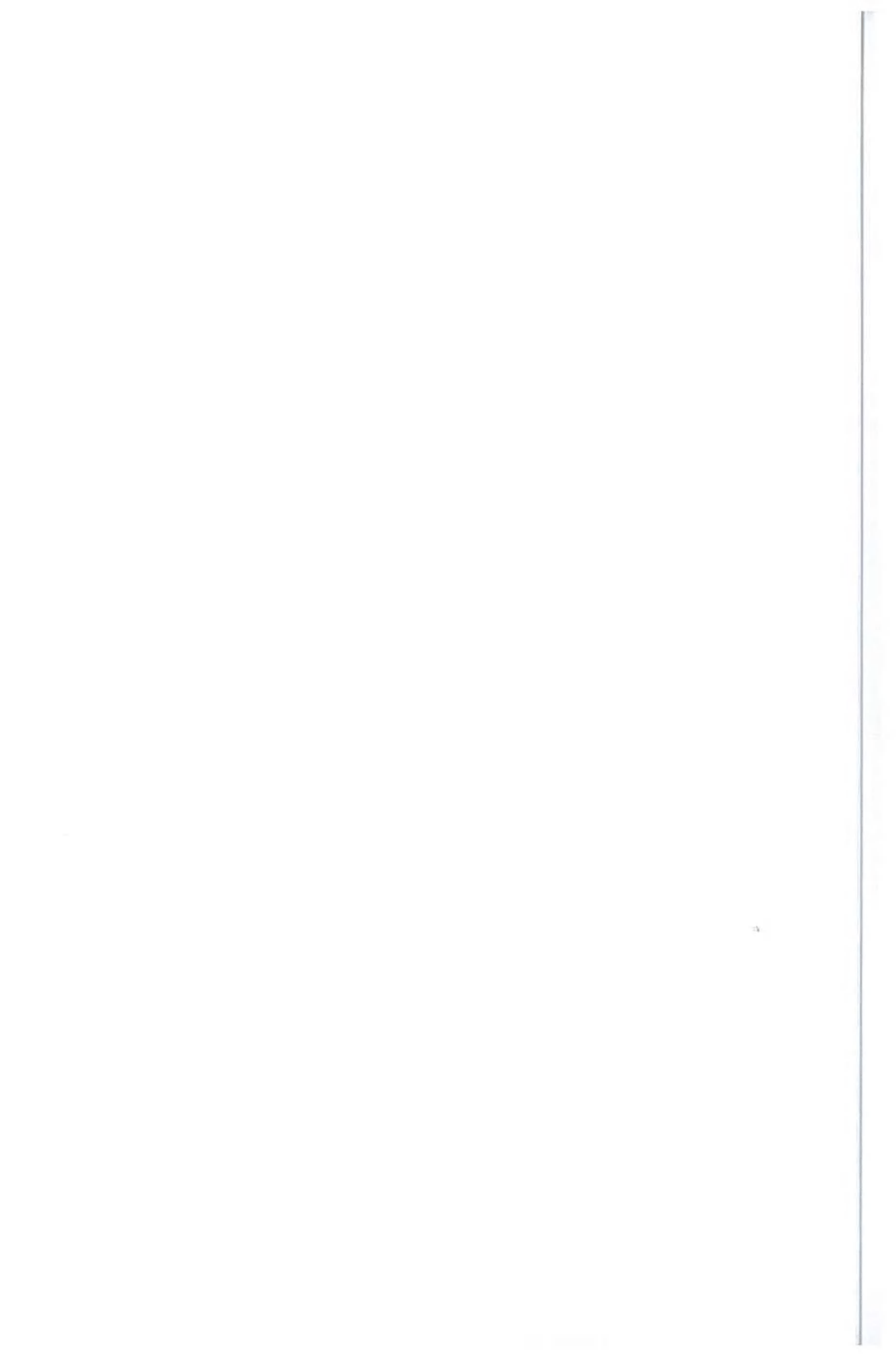
تمّ بحمد الله

العنـوان : رحلة الماء... من المالح إلى العذب
المؤلفان : د هشام الزيات & د شريف قنديل

الموضـــــــــوع : بيئـي
الرقم الدولي للسلسلة : 8 -585 -24 -9948 -978
الرقم الموضوعي : 333.7
عـــــدد الصفحات : 308 صفحة
قيـــــاس الصفحة : 17 - 24 سم
عـــــدد النســـخ : 2000 نسخة

الطبعة الأولى
1439 - 2018م

ص. ب: 28299 دبي - الإمارات العربية المتحدة
برج العلي - شارع الشيخ زايد - رقم 504
هاتف : 3326666 4 971+ - فاكس : 3326777 4 971+
البريد الإلكتروني: secretary@zayedprize.org.ae
الموقع الإلكتروني : www.zayedprize.org.ae



هذا الكتاب

هذا الكتاب يصحبك في رحلة فكرية ممتعة في عالم المياه وتحليتها. وهو يتميز بأنه شامل، عملي، وسهل الفهم؛ فهو يتناول تحلية المياه المالحة من زواياها المختلفة: التاريخية، الإنسانية، التقنية، الاقتصادية، البيئية، الجغرافية، والسياسية.

تشتمل هذه الرحلة على ثلاثة أجزاء رئيسية. يتناول أولها الماء في الوجدان الإنساني، أهميته للحياة، وخصائصه الفريدة. ويستعرض الجزء الثاني بإيجاز حالة المياه العربية. أما الجزء الثالث - وهو الأكبر - فيناقش تحلية المياه المالحة من مختلف جوانبها: بدايتها وتطورها، تقنيات التحلية الرئيسية، مزايا كل طريقة وحدودها، اتجاهات البحث والتطوير، تكاليف التحلية والعوامل المحددة لها، والآثار البيئية للتحلية. كما يستشرف في النهاية وضع التحلية وآفاقها المستقبلية في العالم والمنطقة العربية.

أُعدّ هذا الكتاب ليكون دليلا "عربيا" شاملا لجميع المهتمين بصناعة التحلية. وهو كتاب يستهدف صانعو السياسات ومتخذو القرارات الخاصة بالمياه وإدارتها، والباحثون وطلاب الدراسات العليا المهتمون بأبحاث التحلية، وخريجو الجامعات الراغبون في العمل بهذا المجال، والمستثمرون الراغبون في المشاركة في مشروعات تحلية المياه. وسوف يجد القارئ فيه الكثير من الفائدة والبساطة والجمال.

